



**Rodrigo José Rosa Vieira**  
Licenciado

# **Calibração do modelo SKM com base em medições de turbulência**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia Civil

Orientador: João Leal, Professor, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão  
Arguente: Doutor Mário Jorge Pereira da Franca  
Vogal: Doutor João Gouveia Bento Leal



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Junho 2012**



“Copyright” Rodrigo José Rosa Vieira, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

A melhor maneira de iniciar esta dissertação será começar por agradecer a todos os que, directa ou indirectamente, contribuíram para que este trabalho fosse possível.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu Orientador, Professor João Leal, pela sua disponibilidade, motivação e, sobretudo, amizade demonstradas durante a realização desta dissertação.

Gostaria, também, de agradecer ao Engenheiro João Fernandes pela disponibilidade e apoio que me forneceu ao longo desta dissertação.

Por último, um agradecimento especial à minha Família, namorada e amigos pela motivação que sempre me transmitiram e que foi fulcral para que este trabalho fosse uma realidade.



# Resumo

Pretende-se, com a presente dissertação, apresentar um contributo para o estudo de escoamentos fluviais, nomeadamente na previsão de alturas de água, velocidades e tensões de arrastamento, em situação de cheia. Nestas situações, o leito principal não tem capacidade de vazão para o caudal e transborda, passando o escoamento a processar-se simultaneamente no leito principal e no leito de cheia. O escoamento passa, então, a ser efectuado em secção composta, o que origina o aparecimento de estruturas de escoamento que provocam alterações no mesmo.

O modelo analítico de Shiono e Knight (SKM) requer três parâmetros de calibração,  $f$ ,  $\lambda$  e  $\Gamma$ , referentes, respectivamente, à resistência de fundo, à viscosidade turbulenta e às correntes secundárias. Estes três parâmetros de calibração, quando correctamente definidos, permitem ao modelo obter uma distribuição da velocidade e da tensão de arrastamento bastante próxima da real, o que por sua vez, permitem obter uma estimativa bastante razoável da capacidade de vazão do canal.

Nesta dissertação calibraram-se, a partir de dados experimentais já existentes, os parâmetros do modelo SKM, para seis séries de dados diferentes, correspondentes a seis alturas relativas. Após o cálculo dos parâmetros de calibração foi necessário verificar a sua validade, comparando as distribuições de velocidade longitudinal média em profundidade dada pelo modelo com os parâmetros calibrados com a velocidade longitudinal média em profundidade, calculada directamente a partir dos dados experimentais.

Foi também estudado, mais aprofundadamente o parâmetro das correntes secundárias, sendo que se demonstrou que a obtenção do valor deste parâmetro a partir de dados experimentais de velocidade longitudinal e transversal não era de fácil concretização. Foram, ainda, realizados estudos para melhor se compreender o comportamento do escoamento que se basearam na equação da conservação da quantidade de movimento do escoamento.

## Palavras chave:

Canal de secção composta; Modelo SKM; Resistência de fundo; Viscosidade turbulenta; Correntes secundárias.





# Abstract

It is intended, in this dissertation, to present a contribution to the study of river flows, especially the prediction of water depths, averaged speeds and bed shear stress in the flood situation, which occurs when the main channel reach his maximum flow capacity and overflows into the flood plain. This means that the flow take place, simultaneously, in the main channel and in the flood plain. In this case, the flow is made in compound section, which creates flow structures.

The analytical Shiono & Knight Model (SKM) requires three calibration parameters,  $f$ ,  $\lambda$  and  $\Gamma$ , referring, respectively, to the friction factor, the dimensionless eddy-viscosity and secondary flow term. These three calibration parameters, when correctly set, allow the SKM, to obtain a distribution of averaged velocity and bed shear stress, which in turn, are crucial to calculate the conveyance capacity of the channel.

In this dissertation, the SKM parameters have been calibrated from experimental data, that already had been obtained in experimental tests. This experimental data consist in six different sets, corresponding to six different relative depths. After calculating the calibration parameters, it is necessary to determine their validation, comparing the mean longitudinal velocity distributions in the model by the obtained calibration parameters with the averaged velocity obtained directly from the data.

It has also been studied in more detail the parameter of secondary flows and it has become clear that, in order to obtain the value of this parameter from experimental data of longitudinal and transverse velocity, was not an easy achievement. Were also conducted studies, to better understand the behavior of the flow, which were based on the momentum flow equation.

## Keywords:

Compound channel; SKM; Friction factor; Eddy-viscosity; Secondary flow.



# Índice de Matérias

<b>Copyright</b>	<b>i</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>iii</b>
<b>Resumo</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de abreviaturas, siglas e símbolos</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação e enquadramento do tema . . . . .	1
1.2 Objectivos da Dissertação . . . . .	3
1.3 Estrutura da Dissertação . . . . .	3
<b>2 Estado da arte</b>	<b>5</b>
2.1 Estruturas turbulentas . . . . .	5
2.1.1 Considerações gerais . . . . .	5
2.1.2 Vórtices de eixo vertical . . . . .	6
2.1.3 Células de escoamento secundário . . . . .	6
2.2 Modelos unidimensionais . . . . .	8
2.2.1 Considerações gerais . . . . .	8
2.2.2 Modelos de canais divididos . . . . .	10
2.2.3 Métodos de divisão lateral . . . . .	13
2.3 Modelo analítico de Shiono e Knight . . . . .	14
2.3.1 Considerações gerais . . . . .	14
2.3.2 Parâmetros de calibração SKM . . . . .	17
2.3.3 Propostas de valores dos parâmetros de calibração do modelo SKM . . . . .	18
2.3.4 Desenvolvimentos no modelo SKM . . . . .	19
<b>3 Procedimento de Calibração</b>	<b>23</b>
3.1 Caracterização da instalação experimental . . . . .	23
3.2 Procedimento de calibração . . . . .	25

3.3	Camada de mistura . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>35</b>
4.1	Dados experimentais . . . . .	35
4.2	Parâmetros de calibração . . . . .	37
4.2.1	Parâmetro da resistência de fundo, $f$ . . . . .	37
4.2.2	Parâmetro da viscosidade turbulenta adimensional, $\lambda$ . . . . .	41
4.2.3	Parâmetro das correntes secundárias, $\Gamma$ . . . . .	43
4.3	Validação dos parâmetros . . . . .	48
4.3.1	Considerações gerais . . . . .	48
4.3.2	Aplicação da solução analítica do SKM ao CVC . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Equação da conservação de movimento</b>	<b>61</b>
5.1	Parâmetros adimensionalizados ao longo da secção transversal . . . . .	61
5.2	Análise segundo a altura relativa . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>67</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>69</b>

# Índice de Figuras

1.1	Cheias no rio Zêzere, 2010. (retirada de terras-e-gentes.blogs.sapo.pt)	2
1.2	Escoamento em secção composta . . . . .	2
2.1	Estrutura turbulenta de um escoamento em secção composta (adaptada de Shiono e Knight, 1991) . . . . .	6
2.2	Esquematização dos vórtices de eixo vertical nas interfaces (adaptada de Prooijen, 2005) . . . . .	7
2.3	Perfil de velocidades longitudinal e transversal, (adaptada de Knight <i>et al.</i> , 2007) . . . . .	7
2.4	Sinal do parâmetro do termo médio em profundidade, $(UV)_d$ (adaptada de Knight <i>et al.</i> , 2007) . . . . .	8
2.5	Escoamento em canal natural. (adaptada de Knight, 2001) . . . . .	10
2.6	Factores de ajustamento de vazão, DISDAF, para teste na FCF, serie 2 (adaptada de Acker, 1993a) . . . . .	13
2.7	Distribuição lateral de $-(\rho UV)_d$ (adaptada de Shiono e Knight, 1991)	16
3.1	Canal Veiga da Cunha, LNEC . . . . .	23
3.2	Canal Veiga da Cunha, LNEC (retirada de Duarte, 2011) . . . . .	24
3.3	Secções transversais e eixos do canal (adaptada de Duarte, 2011) .	24
3.4	Perfil das velocidades em perfil transversal para $h_r = 0,30$ . . . . .	27
3.5	Perfil transversal da tensão de arrastamento para $h_r = 0,30$ . . . . .	27
3.6	Comparação entre os valores de $\tau_0$ obtidos no CVC e os obtidos por Shiono e Knight (1991) . . . . .	28
3.7	Perfil transversal do parâmetro de calibração da resistência de fundo, $f$ , para $h_r = 0,30$ . . . . .	29
3.8	Perfil transversal da tensão de Reynolds média em profundidade para $h_r = 0,30$ . . . . .	29
3.9	Perfil da variação transversal da velocidade longitudinal média em profundidade para $h_r = 0,30$ . . . . .	30
3.10	Perfil da variação transversal do parâmetro de calibração da viscosidade turbulenta adimensional, $\lambda$ , para $h_r = 0,30$ . . . . .	30
3.11	Perfil da distribuição do parâmetro das correntes secundárias calculada por dois métodos, para $h_r = 0,30$ . . . . .	31
3.12	Desenvolvimento da camada de mistura na interface do leito principal e leitos de cheia para: a) Posição no início do canal; e b) Posição a jusante do início do canal (Adaptada de Nijs, 2003). . .	32

4.1	Perfil transversal da velocidade média em profundidade, $U_d$ , para todas as alturas relativas estudadas . . . . .	35
4.2	Perfil transversal das tensões de Reynolds médias em profundidade, $(\tau_{yx})_d$ , para todas as alturas relativas estudadas . . . . .	36
4.3	Perfil transversal das tensões de arrastamento, $\tau_0$ , para todas as alturas relativas estudadas . . . . .	37
4.4	Perfil transversal de $\frac{\partial U_d}{\partial y}$ para todas as alturas relativas estudadas . . . . .	38
4.5	Perfil transversal do parâmetro $f$ para todas as alturas relativas estudadas . . . . .	39
4.6	Perfil transversal do parâmetro $f$ e valor médio para cada painel para $h_r = 0, 30$ . . . . .	40
4.7	Comparação entre os valores de $f$ obtidos experimentalmente e os valores obtidos aplicando a equação de Colebrook-White para o LP . . . . .	41
4.8	Comparação entre os valores de $f$ obtidos experimentalmente e os valores obtidos aplicando a equação de Colebrook-White para o painel de transição . . . . .	41
4.9	Comparação entre os valores de $f$ obtidos experimentalmente e os valores obtidos aplicando a equação de Colebrook-White para o LC . . . . .	42
4.10	Relação $\frac{f_{LC}}{f_{LP}}$ . . . . .	42
4.11	Perfil transversal do parâmetro $\lambda$ para todas as alturas relativas estudadas . . . . .	43
4.12	Perfil transversal do parâmetro $\lambda$ e valor médio para cada painel para $h_r = 0, 30$ . . . . .	44
4.13	Comparação entre os valores de $\lambda$ obtidos experimentalmente e os propostos por Knight (1999) e por Ikeda (1981) . . . . .	44
4.14	Perfil transversal do parâmetro $\Gamma$ para todas as alturas relativas estudadas . . . . .	45
4.15	Perfil transversal do parâmetro $\Gamma$ e valor médio para cada painel para $h_r = 0, 30$ . . . . .	46
4.16	Comparação entre os valores de $\Gamma$ propostos em Abril e Knight (2004) e os obtidos nesta dissertação para o LP . . . . .	47
4.17	Comparação entre os valores de $\Gamma$ propostos por Abril e Knight (2004) e os obtidos nesta dissertação para o LC . . . . .	47
4.18	Perfil da velocidade longitudinal média em profundidade, $U_d$ , para $h_r = 0, 30$ , resultante da rotina de MATLAB, com o parâmetro $\Gamma$ calculado pela Metodologia A . . . . .	48
4.19	Perfil da velocidade longitudinal média em profundidade, $U_d$ , para $h_r = 0, 30$ , resultante da rotina de MATLAB, com o parâmetro $\Gamma$ calculado pela Metodologia B . . . . .	49
4.20	Perfil transversal do parâmetro $\Gamma$ para todas as alturas relativas estudadas . . . . .	50
4.21	Canal Veiga da Cunha, LNEC . . . . .	50
4.22	Secção transversal simétrica do CVC . . . . .	51
4.23	Validação dos parâmetros de calibração através da velocidade longitudinal para $h_r = 0, 30$ . . . . .	53
4.24	Validação dos parâmetros de calibração através da tensão de arrastamento para $h_r = 0, 30$ . . . . .	54

4.25 Validação dos parâmetros de calibração através da velocidade longitudinal para $h_r = 0,10$ . . . . .	55
4.26 Validação dos parâmetros de calibração através da velocidade longitudinal para $h_r = 0,15$ . . . . .	56
4.27 Validação dos parâmetros de calibração através da velocidade longitudinal para $h_r = 0,20$ . . . . .	56
4.28 Validação dos parâmetros de calibração através da velocidade longitudinal para $h_r = 0,25$ . . . . .	57
4.29 Validação dos parâmetros de calibração através da velocidade longitudinal para $h_r = 0,38$ . . . . .	57
4.30 Validação dos parâmetros de calibração através da tensão de arrastamento para $h_r = 0,10$ . . . . .	58
4.31 Validação dos parâmetros de calibração através da tensão de arrastamento para $h_r = 0,15$ . . . . .	58
4.32 Validação dos parâmetros de calibração através da tensão de arrastamento para $h_r = 0,20$ . . . . .	59
4.33 Validação dos parâmetros de calibração através da tensão de arrastamento para $h_r = 0,25$ . . . . .	59
4.34 Validação dos parâmetros de calibração através da tensão de arrastamento para $h_r = 0,38$ . . . . .	60
4.35 Curva de vazão experimental e obtida pelo SKM . . . . .	60
5.1 Contribuição dos diferentes componentes do escoamento ao longo da secção transversal do canal para $h_r = 0,30$ . . . . .	62
5.2 Contribuição dos diferentes componentes do escoamento ao longo da secção transversal do canal para $h_r = 0,10$ . . . . .	63
5.3 Contribuição dos diferentes componentes do escoamento ao longo da secção transversal do canal para $h_r = 0,15$ . . . . .	64
5.4 Contribuição dos diferentes componentes do escoamento ao longo da secção transversal do canal para $h_r = 0,20$ . . . . .	65
5.5 Contribuição dos diferentes componentes do escoamento ao longo da secção transversal do canal para $h_r = 0,25$ . . . . .	65
5.6 Contribuição dos diferentes componentes do escoamento ao longo da secção transversal do canal para $h_r = 0,38$ . . . . .	66
5.7 Contribuição dos diferentes parâmetros para o escoamento segundo a altura relativa . . . . .	66





# Índice de Tabelas

3.1	Alturas de água nos painéis da secção para as alturas relativas estudadas . . . . .	25
3.2	Considerações gerais adoptadas . . . . .	26
3.3	Largura da camada de mistura para as alturas relativas estudadas .	33
4.1	Valores de $f$ obtidos pelo procedimento experimental . . . . .	38
4.2	Valores de $f$ por Colebrook-White . . . . .	40
4.3	Valores de $\lambda$ obtidos pelo procedimento experimental . . . . .	43
4.4	Valores de $\Gamma$ obtidos pelo procedimento experimental . . . . .	45
4.5	Valores de $\Gamma$ propostos em Abril e Knight (2004) . . . . .	46



# Lista de siglas, acrónimos e símbolos

## Siglas e acrónimos

COH	Coerência
COHM	Método da Coerência de Ackers
CVC	Canal Veiga da Cunha
DCM	Modelo de Canais Divididos
DISDAF	Factores de Ajustamento de Vazão
FCF	Flood Channel Facility
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
LC	Leito de Cheia
LDM	Método de Divisão Lateral
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LP	Leito Principal
RANS	Equações Médias de Reynolds
SERC	Science and Engineering Research Council
SKM	Modelo de Shiono e Knight
UNL	Universidade Nova de Lisboa
UVP	Ultrasonic Velocity Profiler

## Símbolos

$A$	Área da secção transversal do escoamento
$A_v$	Área projectada de vegetação
$\beta$	Factor de forma (Tipo de vegetação)

$C_d$	Coeficiente de arrastamento
$f$	Factor de Resistência de Darcy-Weisbach
$g$	Aceleração da gravidade
$H$	Altura de água
$H_{LC}$	Altura de água no leito de cheia
$H_{LP}$	Altura de água no leito principal
$h_r$	Altura relativa
$k_s$	Rugosidade absoluta
$K$	Capacidade de vazão
$n$	Coeficiente de rugosidade de Manning
$P$	Perímetro molhado
$Q$	Caudal
$R$	Raio hidráulico
$s$	Inclinação transversal dos painéis considerados no SKM
$S_0$	Inclinação longitudinal do canal
$u$	Velocidade instantânea no sentido do escoamento
$U$	Velocidade média temporal no sentido do escoamento
$U_d$	Velocidade média em profundidade no sentido do escoamento
$u_*$	Velocidade de atrito junto ao fundo
$v$	Velocidade instantânea no sentido transversal ao escoamento
$V$	Velocidade média temporal no sentido transversal ao escoamento
$V_d$	Velocidade média em profundidade no sentido transversal ao escoamento
$w$	Velocidade instantânea no sentido normal ao leito do escoamento
$W$	Velocidade média temporal no sentido normal ao leito do escoamento
$\epsilon_{yx}$	Viscosidade turbulenta
$(\epsilon_{yx})_d$	Viscosidade turbulenta média em profundidade
$\lambda$	Viscosidade turbulenta adimensional
$\rho$	Densidade da água
$\tau_0$	Tensão de arrastamento

- $\tau_{yx}$  Tensões de Reynolds no plano vertical segundo a direcção longitudinal
- $\tau_{xz}$  Tensões de Reynolds no plano horizontal segundo a direcção longitudinal
- $\Gamma$  Termo das correntes secundárias



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação e enquadramento do tema

Desde que há registo, que existe uma grande propensão à fixação de aglomerados populacionais junto a regiões fluviais, muitas vezes ocupando planícies de inundação, ou leitos de cheia (LC). Os LC são, normalmente, planícies com cotas bastante próximas das cotas hidrográficas dos rios ou canais adjacentes. Desta forma, uma subida do nível de água nesses canais faz com que o escoamento do canal, que até então se processava apenas no seu leito principal, (LP), se passe a realizar simultaneamente no LP e no LC, como ilustra a Figura 1.1. A ocupação deste tipo de terrenos por vidas humanas e infra-estruturas, torna essencial a compreensão do comportamento dos escoamentos dos rios, sobretudo em caso de transbordo do LP.

Os prejuízos resultantes das cheias são frequentemente avultados, podendo conduzir a perda de vidas humanas e bens. O impacto socioeconómico na região afectada é geralmente significativo, uma vez que pode levar à destruição de habitações e infra-estruturas, nomeadamente, vias de comunicação, bem como explorações agrícolas e agro-pecuárias. Assim sendo, a análise do risco de cheia e da gravidade dos seus efeitos são de extrema importância para a implementação de políticas de ordenamento do território, bem como na tomada de decisões sobre medidas a adoptar em situação de cheia com vista à prevenção e mitigação das mesmas (ANPC, 2012).

Ao longo dos últimos anos diversos estudos foram realizados com o objectivo de prever o comportamento dos escoamentos quando estes passam a ser efectuados em secção composta, ou seja, quando se processam simultaneamente no LP e no LC, como pode ser observado na Figura 1.2 sendo que tal acontece, normalmente, em situação de cheia. Para além disso, é necessário ter em conta que, a própria heterogeneidade da rugosidade do fundo do LC induz alterações no comportamento do escoamento. Algumas conclusões destes estudos permitem obter, com um aceitável grau de certeza, as distribuições das velocidades médias ao longo da secção e das tensões de arrastamento, distribuições estas, essenciais na previsão da capacidade de vazão do canal e, conseqüentemente, dos impactos das cheias nas infra-estruturas e nas vidas humanas.



Figura 1.1: Cheias no rio Zêzere, 2010. (retirada de terras-e-gentes.blogs.sapo.pt)

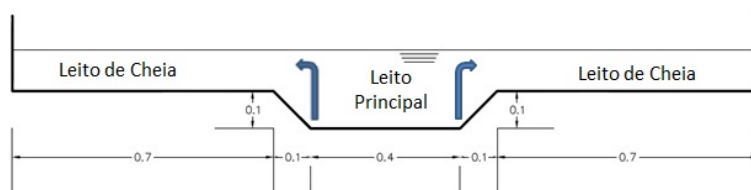


Figura 1.2: Escoamento em secção composta

Em situações de cheia, com escoamentos em secção composta, estabelecem-se interações entre o escoamento no LP e no LC, devido à diferença de velocidade provocada pela diferença de altura entre ambos os leitos. Estas interações provocam a redução da velocidade do escoamento e, conseqüentemente, uma diminuição da capacidade de vazão do rio.

Devido aos fenómenos de interação entre os dois leitos, os modelos unidimensionais que permitem calcular a capacidade de vazão do canal, tornam-se incapazes de fornecer dados precisos sobre o escoamento em estudo. Deste modo, ainda que de modo simplificado, os modelos quase 2-D, já permitem contabilizar estes fenómenos no cálculo da capacidade de vazão, fornecendo assim, resultados bastante mais próximos dos reais comparativamente aos resultados obtidos pelos modelos unidimensionais.

O modelo de Shiono e Knight, alvo de estudo desta dissertação, é um modelo quase 2-D que calcula, de forma eficaz, a capacidade de vazão dos canais onde é aplicado, tornando possível uma melhor compreensão dos fenómenos associados a escoamentos em secção composta. Desta forma, devolve valores bastante fiáveis das velocidades médias de escoamento e das tensões de arrastamento,



que são essenciais para se poder prever a capacidade de vazão dos canais e, conseqüentemente, prever o risco de cheia a que as populações residentes próximas de rios estão sujeitas.

## 1.2 Objectivos da Dissertação

O objectivo desta dissertação é o de efectuar uma calibração dos parâmetros do modelo analítico de Shiono e Knight (SKM), utilizando dados experimentais já existentes. Pretende ainda avaliar, em função das alturas do escoamento, as contribuições de cada termo: turbulência na camada de mistura, correntes secundárias e tensão de arrastamento - na transferência de quantidade de movimento e, conseqüentemente, nas perdas de carga e na capacidade de vazão da secção. Para este propósito foram estabelecidos os seguintes objectivos:

- Partindo dos dados experimentais já existentes e, aplicando a metodologia sugerida por Shiono e Knight (1991), obter os valores dos parâmetros de calibração do modelo SKM.
- Validar os valores obtidos para os parâmetros, aplicando a solução analítica do SKM numa rotina de MATLAB e comparar com os dados experimentais;
- Estudar o peso dos termos adimensionalizados que influenciam o escoamento ao longo da secção transversal;
- Analisar a variação da contribuição dos termos do escoamento com a altura relativa.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

- No capítulo 1 é feita uma introdução ao trabalho que se pretende desenvolver na restante dissertação, bem como os seus objectivos, organização e motivação.
- No capítulo 2 é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre os métodos e modelos existentes de modelação de escoamentos em superfície livre e a sua fiabilidade de aplicação em escoamentos em secção composta. É, também, apresentado neste capítulo, e de forma um pouco mais aprofundada, o modelo aplicado na restante dissertação, o Modelo de Shiono e Knight (SKM).
- No capítulo 3 são explicados de forma exaustiva os processos aplicados para se calcular os parâmetros de calibração do modelo SKM, bem como, algumas considerações tomadas para obtenção dos mesmos.

- No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos dos processos levados a cabo no capítulo 3 desta dissertação, assim como uma breve discussão sobre cada um deles. É ainda apresentado o processo de verificação que determina se os parâmetros calculados se adequam às distribuições de velocidade longitudinal média em profundidade e às distribuições da tensão de arrastamento, também estas medidas experimentalmente.
- No capítulo 5, são analisados os parâmetros adimensionalizados ao longo da secção transversal, que têm a utilidade de ajudar a perceber a contribuição de cada uma das parcelas que entram na equação da conservação da quantidade de movimento do escoamento ao longo da secção transversal. Tentou-se, ainda, analisar a variação da contribuição das componentes daquela equação, em função da altura relativa em estudo, ou seja, perceber de que forma variam estas componentes com a variação da altura relativa.
- No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões deste trabalho e apresentam-se sugestões para trabalhos futuros relacionados com o tema em estudo.

## Capítulo 2

# Estado da arte

### 2.1 Estruturas turbulentas

#### 2.1.1 Considerações gerais

As estruturas de escoamento secundário que ocorrem na zona da interface entre o escoamento no leito principal e do leito de cheia são provocadas pela transferência lateral de quantidade de movimento existente num escoamento em secção composta que, por sua vez, se deve à diferença de velocidades entre o leito principal e o leito de cheia. Estas estruturas turbulentas provocam, por isso, uma grande dificuldade em estimar os parâmetros do escoamento, tais como a capacidade de vazão e a distribuição lateral de velocidade (Shiono e Knight, 1991).

A Figura 2.1 apresenta dois tipos de estruturas turbulentas que são descritos de seguida.

Um dos tipos de estrutura, de eixo vertical e designada por vórtice de interface, resulta da diferença entre as velocidades no leito principal e as velocidades nos leitos de cheia e pode ser observado na zona de interface entre o LP e o LC. O outro, representativo de um tipo de estrutura de eixo longitudinal, designa-se célula de escoamento secundário, resulta da turbulência anisotrópica e pode ser observado, maioritariamente no LP. As estruturas de eixo vertical ocupam a camada de mistura e dependem, essencialmente, da diferença de velocidades entre os leitos. As células de escoamento secundário são influenciadas por diversos factores, tais como, a geometria do canal, a distribuição da rugosidade e para canais de secção composta a altura relativa  $h_r$ , que está definida na equação (2.1) (Shiono e Knight, 1991).

$$h_r = \frac{H_{LP} - h}{H_{LP}} \quad (2.1)$$

onde:

$$h = H_{LP} - H_{LC} \quad (2.2)$$

Em que  $H_{LP}$  é a altura de água no LP e  $H_{LC}$  é a altura de água no LC.

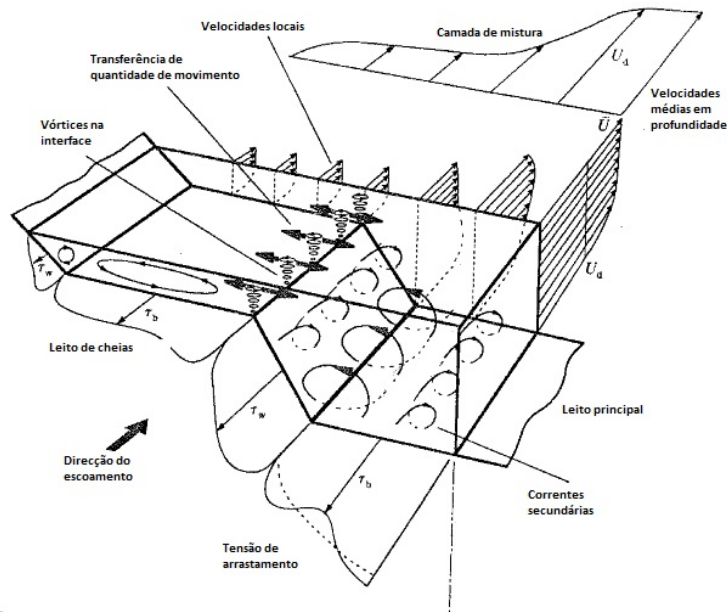


Figura 2.1: Estrutura turbulenta de um escoamento em seção composta (adaptada de Shiono e Knight, 1991)

Importa, portanto, perceber mais detalhadamente o que são estas estruturas turbulentas.

### 2.1.2 Vórtices de eixo vertical

Os vórtices de eixo vertical são estruturas que se formam devido à instabilidade criada na zona da interface entre o LP e o LC, pelos elevados gradientes de velocidade existentes nesta zona. Os vórtices em escoamentos turbulentos exibem uma ampla gama de tamanhos. Os maiores vórtices extraem energia do escoamento e esta é transferida para vórtices suavemente menores até que a energia se dissipa por efeitos viscosos (Wright, 2001).

Na Figura 2.2 encontra-se representado um vórtice formado na zona de interface entre o LC e o LP.

Para alturas relativas baixas, existe um gradiente de velocidade muito elevado na zona da interface entre o LP e o LC, o que faz com que os vórtices turbulentos possuam uma maior importância para este tipo de alturas relativas. De acordo com Ikeda *et al.* (2001), com o aumento da altura relativa,  $h_r$ , (e.g.  $h_r = 0,344$ ) estas estruturas vão perdendo intensidade até que são substituídas por um borbulhar intermitente.

### 2.1.3 Células de escoamento secundário

As células de escoamento secundário são vórtices helicoidais de eixo longitudinal ao escoamento que podem ser observadas, também, na Figura 2.1. Este tipo de

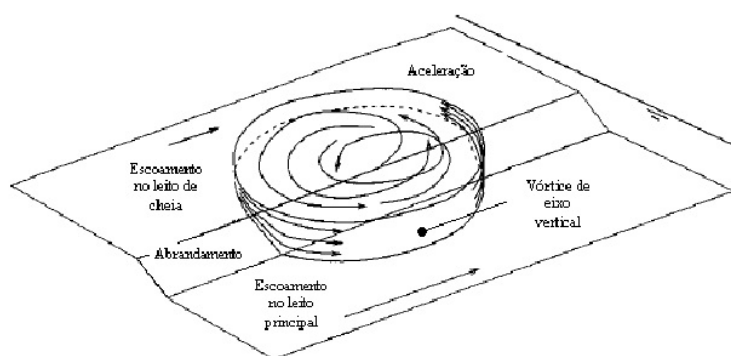


Figura 2.2: Esquemática dos vórtices de eixo vertical nas interfaces (adaptada de Prooijen, 2005)

estruturas retiram energia ao sentido principal do escoamento, e transformam essa energia em movimento transversal, que provoca uma diminuição da velocidade do escoamento no sentido principal. As células de escoamento secundário são influenciadas pela geometria do canal, pela distribuição da rugosidade e para canais de secção composta, pela altura relativa  $h_r$ .

A Figura 2.3 ilustra um perfil típico de velocidade longitudinal e transversal, com uma célula de escoamento secundário com rotação no sentido dos ponteiros do relógio. De acordo com Wormleaton (1996), a distribuição vertical de  $V$ , deve satisfazer três condições (Knight *et al.*, 2007):

1. Velocidade transversal,  $V$  com valor nulo junto ao fundo,  $V = 0$  para  $z = 0$ ;
2. Tensão nula na superfície livre,  $\frac{\partial V}{\partial z} = 0$ ;
3. Continuidade de fluxo constante,  $\int_0^H V dz = 0$ ;

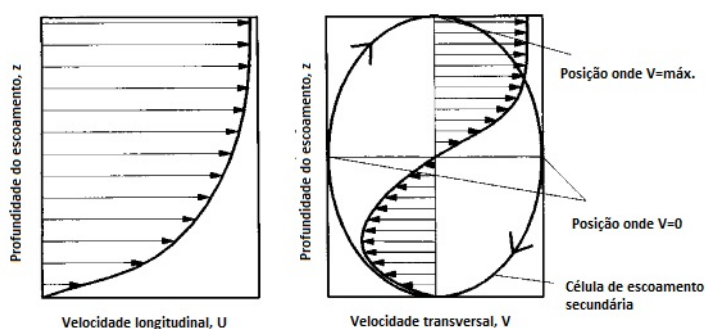


Figura 2.3: Perfil de velocidades longitudinal e transversal, (adaptada de Knight *et al.*, 2007)

Uma vez que a velocidade longitudinal,  $U$ , é sempre positiva, com valores mais elevados nas zonas mais próximas da superfície livre do escoamento comparativamente com os valores no fundo do leito e, sendo a velocidade segundo a direcção transversal,  $V$ , apenas uma pequena fracção de  $U$ , pode-se concluir que  $(UV)_d$  tomará valores positivos quando a rotação se fizer no sentido dos ponteiros do relógio. Por outro lado,  $(UV)_d$  tomará valores negativos quando a rotação se fizer no sentido oposto aos ponteiros do relógio (Knight *et al.*, 2007). Tal pode ser observado na Figura 2.4.

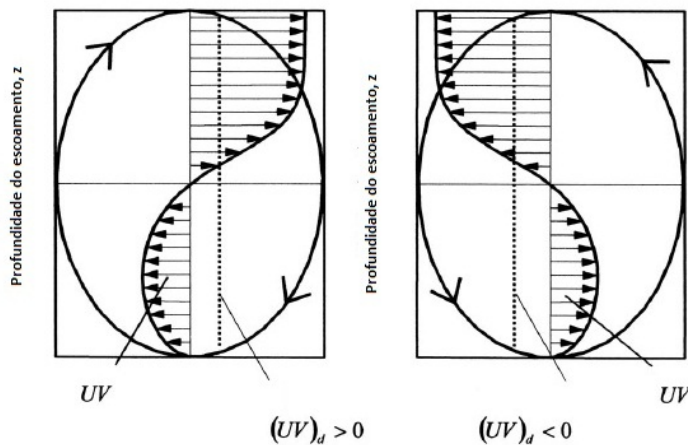


Figura 2.4: [Sinal do parâmetro do termo médio em profundidade,  $(UV)_d$  (adaptada de Knight *et al.*, 2007)]

## 2.2 Modelos unidimensionais

### 2.2.1 Considerações gerais

Para escoamentos que se realizam apenas no leito principal estes modelos são de grande importância devido à simplicidade da sua aplicação. Contudo, quando o escoamento se processa simultaneamente no leito principal e no leito de cheia, os modelos unidimensionais possuem uma grande limitação com dificuldade de aplicação, devido às complexas estruturas 3-D descritas por Nezu e Nakagawa (1993), Ikeda (1999) e Knight (2003), entre outros. A relação entre altura de escoamento,  $H$ , e o caudal,  $Q$ , é de grande importância prática, uma vez que não só relaciona o caudal escoado com a altura de escoamento, como é frequentemente utilizada para obter estimativas da altura de escoamento em casos de cheia extrema (Knight, 2001).

Quando ocorrem cheias, os factores que requerem especial consideração são:

- Raio hidráulico, que sofre uma mudança abrupta em caso de cheia;

- Interação entre o leito principal e o leito de cheia, devido às transferências de energia entre eles;
- Rugosidade heterogénea;
- Zonas de vegetação;
- Variação significativa dos parâmetros de resistência;
- Distribuição das tensões de arrastamento;
- Transporte de sedimentos;
- Níveis de cheia críticos;
- Sinuosidade do leito.

A abordagem tradicional para escoamentos em secção composta utilizando modelos unidimensionais, tem sido a subdivisão da secção em vários painéis. A capacidade de vazão de cada painel é então calculada recorrendo a equações de resistência válidas para secções simples, tais como, a equação de Manning,  $n$ , ou a equação de Darcy-Weisbach,  $f$ , e posteriormente realizando o somatório das capacidades de cada painel. Este método, embora seja de simples aplicação, não devolve resultados aceitáveis quando se dá a cheia, ou seja, quando o escoamento se processa simultaneamente no leito principal e no leito de cheia. Knight *et al.* (1989), mostraram que o valor de Manning global,  $n_{global}$ , decresce abruptamente quando o leito principal transborda. Este efeito, no entanto, é fictício uma vez que se deve a mudanças significativas no raio hidráulico,  $R$ , e nada tem a ver com alterações reais na rugosidade do leito (Knight, 2001).

A generalidade dos modelos unidimensionais que definem escoamentos turbulentos são definidos recorrendo às Equações médias de Reynolds. Quando o escoamento se dá predominantemente numa só direcção, como é o caso de um rio, a equação da conservação da quantidade de movimento longitudinal pode ser expressa, em combinação com a equação da continuidade por (Shiono e Knight, 1991):

$$\underbrace{\rho \left[ \frac{\partial(UV)}{\partial y} + \frac{\partial(UW)}{\partial z} \right]}_I = \underbrace{\rho g H S_0}_{II} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y}(-\rho \bar{uv})}_{III} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z}(-\rho \bar{uw})}_{IV} \quad (2.3)$$

onde  $x, y, z$  são as direcções principal, transversal e vertical do escoamento respectivamente,  $U, V, W$  são as médias temporais das componentes da velocidade correspondentes a  $x, y, z$ , e  $u, v, w$ , são as perturbações turbulentas da velocidade. A barra por cima dos factores indica uma média temporal,  $\rho$  é a densidade da água,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $S_0$  é a inclinação longitudinal do canal e, é assumido um declive constante na direcção transversal. O significado físico dos termos da equação (2.3), são: (I) = Termos das correntes secundárias, (II) = Termo da componente gravítica, (III) = Termo da tensão no plano vertical segundo a direcção longitudinal de Reynolds e (IV) = Termo da tensão horizontal segundo a direcção longitudinal de Reynolds (Shiono e Knight, 1991).

As equações de Navier-Stokes aplicam-se a um único ponto, “J”, e nesse ponto o escoamento pode ser caracterizado pela Figura 2.5. (Knight, 2001)

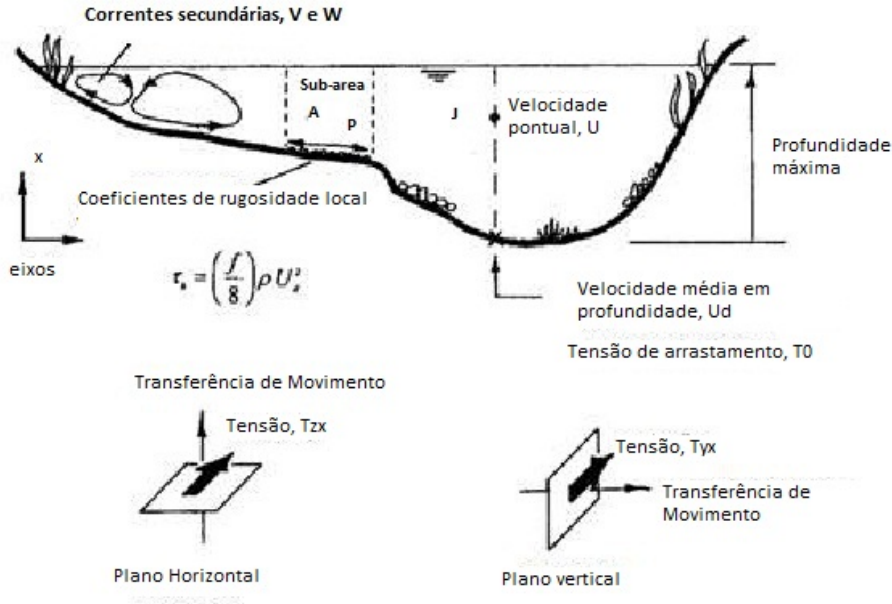


Figura 2.5: Escoamento em canal natural. (adaptada de Knight, 2001)

Uma das maiores preocupações ao nível da Engenharia Fluvial passa pela correcta definição dos parâmetros nas fronteiras do escoamento. Assim sendo a equação (2.3) deve ser integrada na profundidade, na largura ou na área para que possa ter uso prático. Se as distribuições laterais forem de grande importância, como usualmente são, então a equação (2.3) deve ser integrada na profundidade, originando a equação 2-D média em profundidade, apresentada de seguida (Knight, 2001).

$$\underbrace{\rho g H S_o}_{II} - \underbrace{\frac{1}{8} \rho f U_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}}}_{IV} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \lambda h^2 \sqrt{\frac{f}{8}} U_d \frac{\partial U_d}{\partial y} \right)}_{III} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} [H (\rho U V)_d]}_I \quad (2.4)$$

Na equação (2.4), os termos têm a numeração dos termos correspondentes na equação (2.3), assume-se que o termo  $\frac{\partial U V}{\partial z}$  em profundidade é desprezável e, que a tensão de arrastamento nas fronteiras está relacionada com a velocidade média em profundidade  $U_d$ .

## 2.2.2 Modelos de canais divididos

Os métodos de subdivisão da secção (Ver Chow, 1959) não são adequados para canais de secção composta devido à contribuição das estruturas turbulentas apresentadas na secção 2.2 para a transferência de quantidade de movimento, ou



por outras palavras, para as perdas de carga. À luz dos conhecimentos adquiridos sobre estruturas de escoamento em canais de secção composta, uma série de sugestões têm sido feitas para modificação dos Métodos de Canal Dividido (DCM), com o objectivo de simular o processo de interacção em canais de secção composta com maior exactidão (Lambert e Mayers, 1998). Os métodos são divididos em cinco categorias apresentadas de seguida (Knight, 2001).

A primeira metodologia consiste em alterar o perímetro molhado,  $P$ , excluindo o comprimento da interface vertical entre o leito principal e o leito de cheia no cálculo de  $P$  relativo ao leito de cheia, mas incluindo-o no valor de  $P$  do leito principal. O objectivo é provocar o retardamento no escoamento no painel do leito principal e aumentar o mesmo no painel do leito de cheia. Contudo, esta metodologia falha quando as forças de interacção são elevadas para alturas de escoamento,  $H$ , baixas, pois a linha de interface entre o leito principal e o leito secundário é curta e insuficiente para contabilizar as forças de interacção nessa mesma interface. Embora diversas variações no tipo de abordagem tenham sido tentadas, foi reconhecido que seria mais fiável ajustar os caudais a cada painel com recurso a um método mais apropriado (Knight, 2001).

A segunda abordagem é baseada na quantificação de esforços tangenciais aparentes nas linhas de divisão dos painéis. Este procedimento requer o conhecimento das tensões de Reynolds médias em profundidade e dos termos de vorticidade. Estes esforços são depois incluídos numa análise unidimensional de modo a ser obtida a tensão tangencial efectiva para cada painel e, conseqüentemente, a capacidade de vazão para cada um deles. Esta metodologia, por sua vez, permite obter a correcta divisão de caudal dentro da secção transversal. Muitos autores tentaram desenvolver equações empíricas para os esforços tangenciais aparentes em linhas de divisão específicas. A maioria destas equações incluem a relação entre a profundidade do leito de cheia e a profundidade do leito principal, conhecida também como profundidade ou altura relativa,  $h_r$ , como uma variável primária, e a largura e rugosidade relativa do leito de cheia ( $n_{fp}/n_{mc}$ ) como variáveis secundárias. Embora a maioria destas equações possam encaixar-se relativamente bem num vasto conjunto de dados experimentais (Moretta *et al.*, 2011), não são aplicáveis na generalidade (Fernandes *et al.*, 2011).

Uma outra abordagem, que vem no seguimento da anterior, especifica as linhas de divisão entre os painéis de modo a coincidirem com as linhas onde a tensão tangencial é nula. Contudo, a natureza tridimensional dos campos de velocidade do escoamento, torna bastante difícil de determinar a posição das linhas de divisão para todos os tipos de secções de canal, profundidade do escoamento e configuração da rugosidade (Knight, 2001).

A quarta metodologia consiste em combinar os métodos dos canais divididos usando interfaces verticais e horizontais, associando-as a um factor de ponderação, conforme sugerido por Lambert e Meyers (1998). Nesta abordagem, um único factor de ponderação é aplicado às velocidades previstas pelo método da divisão vertical e horizontal, para produzir uma velocidade intermédia que

represente, mais aproximadamente, a velocidade observada tanto no leito principal como no leito de cheia (Knight, 2001).

Por último, a quinta abordagem do método dos canais divididos, é designada por *Coherence Method* (COHM), e foi proposta por Ackers (1991), sendo considerada, uma das melhores aproximações unidimensionais para escoamentos em secção composta, em que existam rugosidades heterogéneas e efeitos de forma. Este método é definido como sendo uma relação entre a capacidade de vazão, considerando o canal como uma única secção em que o factor de resistência é ponderado ao longo do perímetro molhado, com a capacidade de vazão calculada dividindo o canal em painéis e somando as capacidades de cada um para obter a capacidade total de vazão do canal (Ver equação seguinte) (Knight, 2001).

$$COH = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} A_i \sqrt{\left[ \frac{\sum_{i=1}^{i=n} A_i}{\sum_{i=1}^n (f_i P_i)} \right]}}{\sum_{i=1}^{i=n} \left[ A_i \sqrt{\frac{A_i}{f_i P_i}} \right]} \quad (2.5)$$

Onde  $i$  identifica cada uma das  $n$  zonas. Quanto mais próximo da unidade estiver o valor de COH, mais apropriado se torna tratar o canal com uma única secção. O valor mais reduzido que COH pode tomar é de 0,5.

Em casos em que o valor de COH seja muito inferior à unidade, são necessários factores de ajustamento, de modo a corrigir os escoamentos individuais em cada painel. Estudos experimentais no FCF realizados por Ackers (1993a), sugerem que são necessários factores de ajustamento DISDAF, diferentes para pelo menos quatro regiões de profundidade distintas, como se pode observar na Figura 2.6 (Knight, 2001).

As regiões representam:

- Região 1 - Para alturas relativas baixas, a interacção aumenta com a profundidade;
- Região 2 - Para alturas relativas moderadas, a interacção diminui;
- Região 3 - Para alturas relativas elevadas ocorre mais interacção;
- Região 4 - O canal pode ser considerado como um canal de secção única.

Os resultados experimentais obtidos por Ackers (1993b), mostram que:

$$COH < DISDAF < 1.0 \text{ i.e. } \frac{Q_{single}}{Q_{zones}} \leq \frac{Q_{actual}}{Q_{zones}} \leq 1 \quad (2.6)$$

Isto implica que, quando ocorrem cheias, para uma dada profundidade, a capacidade de vazão será sempre menor que a capacidade calculada com base na soma das capacidades de vazão nas diferentes zonas, mas maior do que a obtida quando se considera o canal como apenas tendo uma secção:

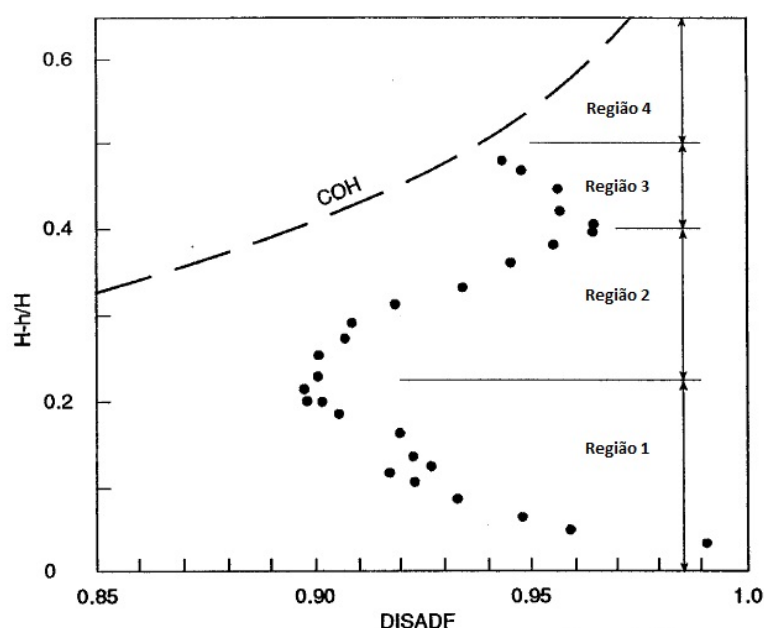


Figura 2.6: Factores de ajustamento de vazão, DISDAF, para teste na FCF, serie 2 (adaptada de Acker, 1993a)

$$Q_{single} \leq Q_{actual} \leq Q_{zones} \quad (2.7)$$

O transporte, ou capacidade de vazão de um canal, está relacionado com o declive de energia devido a parâmetros geométricos e de rugosidade. Chow (1959) definiu a capacidade de vazão,  $K$ , sendo (Knight, 2001):

$$Q = K \sqrt{S_f} \quad (2.8)$$

Ackers (1993a) introduziu um parâmetro modificado da capacidade de vazão,  $K_d$ , com o objectivo de melhor a integrar na análise de escoamentos em canal de secção composta. Assim, para um canal de secção composta que seja dividido em 3 painéis, um canal principal e dois leitos de cheia simétricos, o factor  $K_{DB}$ , é obtido pela soma das capacidades de vazão individuais ( $K_d$ ) para cada painel. A capacidade real é calculada através da multiplicação da capacidade básica pelo parâmetro de ajustamento, DISDAF, obtendo-se assim, o caudal correcto (Knight, 2001).

### 2.2.3 Métodos de divisão lateral

O método de divisão lateral (LDM) é uma aproximação 2-D, desenvolvido a partir dos modelos unidimensionais descritos anteriormente. Este método consiste na divisão da secção do escoamento em várias painéis, em que cada um é modelado analiticamente e é calculado o caudal ou a velocidade média em profundidade para cada painel. Posteriormente, são somados os caudais ou velocidades médias em profundidade de modo a obter o caudal total do canal.

A equação de Navier-Stokes média em profundidade apresentada com o índice (2.4) forma a base desta aproximação 2-D. Este método é calibrado com recurso a dois parâmetros  $f$  e  $\lambda$ , sendo  $f$  o parâmetro que representa o atrito causado pelo fundo do leito que é dependente da tensão de arrastamento e da velocidade média em profundidade e  $\lambda$  o parâmetro que engloba não só a mistura lateral que ocorre no canal como também as estruturas helicoidais produzidas durante o escoamento. A equação mais frequentemente utilizada neste método é (Knight, 2001):

$$\rho ghS - \frac{\beta f q^2}{8h^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \varepsilon_t \frac{\partial q}{\partial y} \right] = 0 \quad (2.9)$$

onde  $\beta$  é o factor que relaciona a tensão num plano inclinado com a tensão num plano horizontal,  $q$  é a intensidade do escoamento ( $= U_d h$ ) e  $\varepsilon_t$  é usado como um factor que engloba a mistura lateral e as estruturas helicoidais. (Knight, 2001)

Os modelos do tipo LDM são muito semelhante ao modelo SKM, apresentado de seguida, diferindo apenas no termo das correntes secundárias que no caso do LDM, a sua contribuição para o escoamento é considerada em conjunto com a da turbulência da camada de mistura num mesmo parâmetro de calibração.

## 2.3 Modelo analítico de Shiono e Knight

### 2.3.1 Considerações gerais

À semelhança do modelo anterior, o modelo analítico de Shiono e Knight, é também uma aproximação 2-D, que fornece as distribuições laterais de velocidade média em profundidade e as tensões de arrastamento no fundo do leito de escoamento. Este modelo baseia-se em três parâmetros de calibração relacionados com a resistência de fundo,  $f$ , com a viscosidade turbulenta,  $\lambda$ , e com o parâmetro adimensional das correntes secundárias,  $\Gamma$ , (Shiono e Knight, 1991). As soluções numéricas do SKM, podem ser obtidas através da divisão da secção transversal em elementos lineares, especificando os três parâmetros de calibração para cada um destes elementos. Este modelo, tem demonstrado produzir resultados bastante satisfatórios de velocidade de escoamento médias em profundidade e de tensões de arrastamentos no leito, tanto para canais de secção simples como para canais de secção composta (Tang e Knight, 2008). O SKM, tal como a grande maioria dos modelos, baseia-se nas equações de Navier-Stokes Médias de Reynolds (RANS) que, quando combinadas com a equação de continuidade e considerando um regime uniforme ( $\frac{\partial}{\partial x} = 0$ ) e  $W(H)=W(0) = 0$ , fica,

$$\frac{\partial H(\rho UV)_d}{\partial y} = \rho g H S_0 + \frac{\partial H(\tau_{yx})_d}{\partial y} - \tau_0 \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}} \quad (2.10)$$

em que  $\tau_0$  é a tensão de arrastamento no fundo,  $s$  é a inclinação transversal no leito (1 : s, vertical : horizontal)

$$(\rho UV)_d = \frac{1}{H} \int_0^H \rho UV \, dz. \quad (2.11)$$

$$(\tau_{yx})_d = \frac{1}{H} \int_0^H (-\rho \overline{uv}) \, dz. \quad (2.12)$$

Neste modelo, a tensão de arrastamento transversal média em profundidade é expressa em termos do gradiente lateral da velocidade média em profundidade:

$$(\tau_{yx})_d = \rho(\epsilon_{yx})_d \frac{\partial U_d}{\partial y} \quad (2.13)$$

Como a viscosidade turbulenta,  $\epsilon_{yx}$ , tem como unidades  $m^2/s$ , é frequente relacionar a velocidade de atrito média junto ao fundo,  $u_*$ , com a profundidade,  $H$ , através da viscosidade turbulenta adimensional,  $\lambda$ . Utilizando a tensão de arrastamento média,  $\tau_0$ , em conjunto com o factor de resistência de Darcy-Weisbach,  $f$ , relaciona-se a velocidade média,  $U_d$ , com a velocidade de atrito média junto ao fundo,  $u_*$  (Shiono e Knight, 1991).

$$f = \frac{8\tau_0}{\rho U_d^2} \quad (2.14)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2.15)$$

Substituindo as equações (2.11) a (2.15) na equação (2.10) fica:

$$\rho g H S_0 - \frac{1}{8} \rho f U_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \rho \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8}} U_d \frac{\partial U_d}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial y} [H(\rho UV)_d] \quad (2.16)$$

Em Shiono e Knight (1991), foi observado que o termo  $(\rho UV)_d$ , decresce de modo aproximadamente linear a partir do valor máximo que ocorre na zona de interacção entre o leito de principal e o leito de cheia (Ver Figura 2.7).

Logo, o gradiente lateral da força de escoamento secundário por unidade de comprimento do canal, pode ser dado por:

$$\frac{\partial (H \rho UV)_d}{\partial y} = \Gamma \quad (2.17)$$

em que  $\Gamma$ , é o termo correspondente às correntes secundárias. Embora a aproximação anterior seja de primeira ordem, esta permite que a equação (2.16) seja resolvida analiticamente, podendo ser simplificada considerando que:

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \rho f U_d^2 \quad (2.18)$$

e

$$(\tau_{yx})_d = \left[ \rho \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8}} U_d \frac{\partial U_d}{\partial y} \right] \quad (2.19)$$

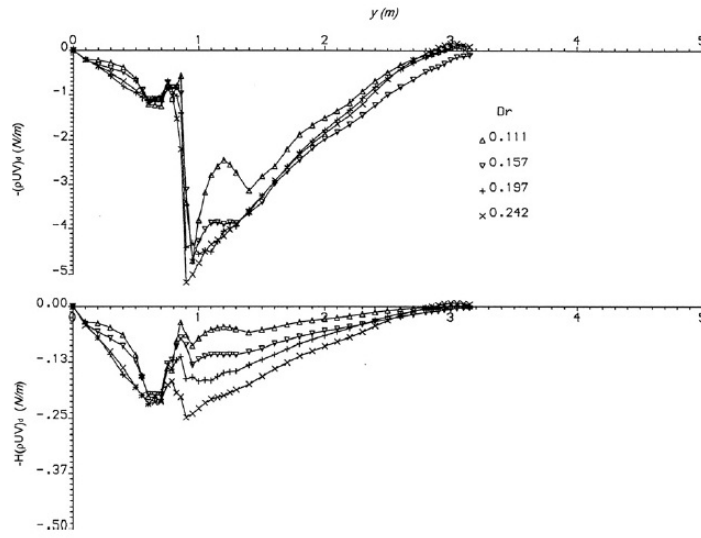


Figura 2.7: Distribuição lateral de  $-(\rho U V)_d$  (adaptada de Shiono e Knight, 1991)

ficando então,

$$\rho g H S_0 - \tau_0 \sqrt{1 + \frac{1}{S^2}} + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yx})_d = \Gamma \quad (2.20)$$

A equação (2.20), mostra que a tensão de arrastamento,  $\tau_0$ , é influenciada pelas tensões tangenciais e pelas correntes secundárias, diferindo do valor baseado na profundidade local. Resulta desta aproximação 2-D, que qualquer coeficiente de resistência, irá ser influenciado por estruturas de escoamento 3-D. A solução analítica da equação (2.20) foi proposta por Shiono e Knight, (1991), e apresenta duas soluções distintas conforme a profundidade é constante ou linearmente variável. A solução proposta para profundidade constante foi:

$$U_d = \sqrt{C_1 e^{\gamma y} + C_2 e^{-\gamma y} + k} \quad (2.21)$$

Em que  $C_1$  e  $C_2$  são constantes, que se obtém através da análise das condições de fronteira e  $\gamma$  e  $k$  são dados pelas equações (2.22) a (2.24),

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\lambda}} \sqrt{\frac{f}{8}} \frac{1}{H} \quad (2.22)$$

$$k = \frac{8gS_0H}{f}(1 - \beta) \quad (2.23)$$

$$\beta = \frac{\Gamma}{\rho g H S_0} \quad (2.24)$$

Para profundidade linearmente variável a solução analítica é dada pela equação (2.25)

$$U_d = \sqrt{C_3 \xi^\alpha + C_4 \xi^{-(\alpha+1)} + \omega \xi + \eta} \quad (2.25)$$

em que  $C_3$  e  $C_4$  são constantes que se obtém através da aplicação das condições

de fronteira e  $\alpha$ ,  $\omega$  e  $\eta$  são dados pelas equações (2.26) a (2.28).

$$\alpha = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{s\sqrt{(1+s^2)}}{\lambda} \sqrt{8f}} \quad (2.26)$$

$$\omega = \frac{gS_0}{\frac{\sqrt{1+s^2}}{s} \frac{f}{8} - \frac{\lambda}{s^2} \sqrt{\frac{f}{8}}} \quad (2.27)$$

$$\eta = \frac{-\Gamma}{\rho \frac{f}{8} \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}}} \quad (2.28)$$

O parâmetro  $\xi$  é a profundidade local e é dada por:

$$\xi = H \pm \frac{y \pm b}{s} \quad (2.29)$$

O sinal negativo na equação (2.29) é utilizado quando o ponto mais alto se encontra do lado esquerdo, e o sinal positivo é utilizado se o ponto mais alto se encontra do lado direito. (Shiono e Knight, 1991)

### 2.3.2 Parâmetros de calibração SKM

A correcta aplicação do modelo SKM depende, maioritariamente, da calibração dos seus coeficientes. Este processo de calibração tem sido alvo de diversos estudos de modo a tentar definir-se a relação entre coeficientes e serem recomendados valores que, para determinadas geometrias e características do escoamento, possam calcular com exactidão a distribuição de velocidade média em profundidade e a distribuição da tensão de arrastamento.

Importa, antes de se aprofundar as propostas de diversos autores para os valores a adoptar, perceber o que são, como se calculam e o que estes coeficientes de calibração pretendem contabilizar.

#### Resistência de Fundo $f$

O parâmetro de calibração da resistência de fundo  $f$  representa o atrito causado pelo fundo do leito e depende da tensão de arrastamento,  $\tau_0$  e da velocidade média em profundidade,  $U_d$ . Este pode ser obtido através da análise dos resultados experimentais, ou recorrendo à equação de Colebrook-White como recomendado por Shiono (2011). A obtenção do parâmetro  $f$  através da análise de resultados experimentais implica a aplicação da equação (2.30), pelo que, é necessário o prévio conhecimento da velocidade média em profundidade e da tensão de arrastamento no fundo do leito.

$$f = \frac{8\tau_0}{\rho U_d^2} \quad (2.30)$$

### Viscosidade Turbulenta, $\lambda$

O parâmetro de calibração da viscosidade turbulenta adimensional,  $\lambda$ , descreve a mistura lateral que ocorre no canal. Este termo é calculado através de dados experimentais aplicando a equação (2.31).

$$\lambda = \frac{(\tau_{yx})_d}{\rho H u_* \frac{\partial U_d}{\partial y}} \quad (2.31)$$

em que,

$$(\tau_{yx})_d = \rho(\epsilon_{yx})_d \frac{\partial U_d}{\partial y} \quad (2.32)$$

e

$$(\epsilon_{yx})_d = \lambda u_* H \quad (2.33)$$

Para o cálculo é necessário conhecer o gradiente lateral da velocidade média em profundidade  $\frac{\partial U_d}{\partial y}$ , as tensões de Reynolds médias em profundidade,  $(\tau_{yx})_d$ , e a velocidade de atrito junto ao fundo,  $u_*$ , que pode ser obtida da tensão de arrastamento aplicando a equação (2.15).

### Termo das Correntes Secundárias $\Gamma$

O termo das correntes secundárias é o parâmetro de calibração mais importante do SKM, pois possui uma grande contribuição para o balanço das forças na equação da conservação da quantidade de movimento, equação (2.10). Este parâmetro representa o escoamento secundário observado anteriormente e que pode ser visualizado nas Figuras 2.1, 2.3 e 2.4. A obtenção deste termo pode-se efectuar experimentalmente, através da aplicação da equação (2.34), sendo que, para isso é necessário obter medições experimentais de velocidades médias em profundidade na direcção longitudinal e transversal do escoamento.

$$\Gamma = \frac{\partial H \rho (UV)_d}{\partial y} \quad (2.34)$$

em que,  $U$  e  $V$  representam, respectivamente a velocidade média temporal na direcção longitudinal e transversal cujo produto é, posteriormente, integrado na profundidade.

### 2.3.3 Propostas de valores dos parâmetros de calibração do modelo SKM

Como anteriormente referido, existiram diversos estudos cujo objectivo passava por tentar definir valores para os parâmetros de calibração do modelo SKM. Vários autores, tais como Knight (1999), Abril e Knight (2004) e Knight e Abril (1996), estudaram a relação entre parâmetros para que, de acordo com a geometria e características do escoamento, o modelo SKM conseguisse determinar com precisão as distribuições de velocidade média e da tensão de arrastamento.



De acordo com o recomendado por Shiono (2011), o factor de resistência Darcy-Weisbach,  $f$ , pode facilmente, ser obtido com recurso à equação de Colebrook-White, ou, através dos dados experimentais, como foi o caso da presente dissertação.

Segundo Ikeda (1981), a viscosidade turbulenta adimensional, que representa a mistura lateral que ocorre no canal, toma geralmente o valor de 0,07. Contudo, Knight (1999) propôs, para a instalação experimental SERC-FCF, a utilização dos seguintes valores:

- $\lambda = 0,13$ , para canais de secção única;
- $\lambda = 0,16$ , para canais de secção trapezoidal;
- $\lambda = 0,27$ , para leitos de cheia lisos (SERC-FCF);
- $\lambda = 0,22$ , para leitos de cheia rugosos(SERC-FCF);
- $\lambda = 0,067$ , para extremidades do canal.

O termo das correntes secundárias, representa as células de escoamento secundário. A correcta calibração deste parâmetro é fundamental para a correcta aplicação do modelo SKM e para a obtenção de valores precisos de velocidade média e de tensão de arrastamento. Abril e Knight (2004), propuseram a utilização de:

- $\Gamma = 0,05gHS_0\rho$ , para escoamentos apenas no leito principal;
- $\Gamma = 0,15gH_{LP}S_0\rho$ , para escoamentos no leito principal;
- $\Gamma = -0,25gH_{LC}S_0\rho$ , para escoamentos no leito de cheia.

#### 2.3.4 Desenvolvimentos no modelo SKM

A investigação que ocorreu em torno do modelo SKM, comprovou que este consegue modelar com exactidão tanto a distribuição de velocidades como a tensão de arrastamento, para várias geometrias de canais distintas.

Os estudos realizados, incluem Shiono e Knight (1988 e 1991), onde é apresentada a solução analítica do SKM e Knight e, Shiono (1990 e 1996) onde é apresentada a solução numérica do modelo. Os estudos mencionados acima, concentraram-se maioritariamente em canais de secção composta, demonstrando, assim, a fiabilidade do modelo para escoamentos deste tipo. Mais recentemente, foram realizados estudos que comprovaram que este modelo também tem aplicabilidade para canais de secção simples.

Considerando  $\lambda = 0,13$  para toda a secção transversal, Knight e Abril (1996) e Abril e Knight (2002), aplicaram o SKM a dados experimentais e fizeram variar o valor de  $\Gamma$  para os vários painéis em que a secção se considerou dividida. Efectuou-se, também, outra aplicação em que se manteve  $\lambda = 0,13$  para todos

os painéis e se fez variar o valor de  $f$ , desprezando-se o valor de  $\Gamma$ . Esta última aplicação não devolveu bons resultados da distribuição da velocidade, pelo que, é possível perceber a importância que este parâmetro de calibração tem no modelo SKM.

Tang e Knight (2008) mostraram que o modelo SKM pode ser aplicado em escoamentos em leito principal de canais simétricos. Estes canais simétricos incluem canais trapezoidais e canais em “V” com paredes laterais verticais. Este investigadores consideraram que  $\Gamma$  podia ser modelado através de uma distribuição linear, dada pela equação seguinte:

$$\Gamma = \frac{\delta}{\delta y} [H(\rho UV)_d] = \frac{\delta}{\delta y} [\xi \psi] = \xi \frac{\delta \psi}{\delta y} + \psi \frac{\delta \xi}{\delta y} = \Gamma^* \xi + \psi \frac{\delta \xi}{\delta y} \quad (2.35)$$

Onde:

$$\psi = (\rho UV)_d \quad (2.36)$$

$$\Gamma^* = \frac{\delta \psi}{\delta y} = \frac{\delta(\rho UV)_d}{\delta y} \quad (2.37)$$

Sendo que é possível observar que para altura de água constante vem:

$$s = \infty \rightarrow \xi = H \rightarrow \Gamma = H\Gamma^* \quad (2.38)$$

No caso de canais com inclinação transversal fica:

$$\Gamma = \Gamma^* \xi + \psi \frac{\delta \xi}{\delta y} \quad (2.39)$$

Omram (2005) e Knight *et al.* (2007) comprovaram ser possível calibrar o modelo SKM tanto para canais de secção simples, como para canais de secção composta. Ficou demonstrado, através desses estudos, que é possível obter valores precisos para tensões tangenciais, calibrando o modelo SKM com o parâmetro  $\lambda$  constante, igual a 0,07, obtendo  $f$  a partir dos dados experimentais e calibrando  $\Gamma$ .

Tang e Knight (2009) e Knight *et al.* (2010) mostraram que é possível obter previsões precisas tanto para secções simples, como para secções compostas parcialmente preenchidas com vegetação. Para tal, adicionaram uma força de arrastamento à RANS com o objectivo de contabilizar o efeito provocado pela mesma. Fica então:

$$\rho \left[ \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{\partial UW}{\partial z} \right] = \rho g H S_0 + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} - F_v \quad (2.40)$$

Em que  $F_v$  é o termo relativo à força de arrastamento por unidade de volume de fluido e é fornecido por:

$$F_v = \frac{1}{2} \rho (C_D \beta A_v) U^2 \quad (2.41)$$

Em que  $C_d$  corresponde ao coeficiente de arrastamento,  $\beta$  é o factor de forma que tem em consideração o tipo de vegetação e  $A_v$  é a área projectada de vegetação

no sentido do escoamento por unidade de volume de fluído.

Utilizando a equação proposta por Shiono e Knight (1988 e 1991), para escoamentos em zonas da secção transversal com altura de água constante é possível obter a solução analítica para zonas da secção transversal com altura de água constante.

$$U_d = \sqrt{C_1 e^{\gamma y} + C_2 e^{-\gamma y} + k} \quad (2.42)$$

Em que:

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\lambda}} \left( \frac{f}{8} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{1}{H} \sqrt{\frac{f}{8} + \frac{H}{2\theta} C_D \beta A_v} \quad (2.43)$$

$$k = \frac{g S_0 H - \frac{\Gamma}{\rho}}{\frac{f}{8} + \frac{1}{2\theta} C_D \beta A_v} \quad (2.44)$$

Na presente dissertação não foi considerada a presença de vegetação, pelo que esta solução analítica é igual à apresentada anteriormente.



## Capítulo 3

# Procedimento para obtenção dos parâmetros de calibração

### 3.1 Caracterização da instalação experimental

Nesta primeira secção do presente capítulo, irá ser efectuada uma breve descrição da instalação experimental onde decorreram os ensaios realizados por Pinto (2010), Massa (2011) e Teixeira (2011) de onde foram retirados os dados analisados nesta dissertação. Será feita, também, uma breve referência aos equipamentos utilizados para a obtenção desses dados.

A instalação onde foram obtidos os dados experimentais utilizados nesta dissertação, chama-se Canal Veiga da Cunha (CVC) e situa-se no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Possui uma secção transversal, mostrada na Figura 3.1 e, é constituída por um leito de maior profundidade (3), denominado leito principal (LP), e por dois leitos adjacentes, de menor profundidade (1 e 5), denominados por leitos de cheia (LC). A transição entre o leito principal e os leitos de cheia adjacente é feita através de um painel de inclinação constante, com um ângulo de  $45^\circ$  (2 e 4). O canal tem aproximadamente 10,0 m de comprimento por 2,0 m de largura e possui a secção transversal simétrica. A inclinação longitudinal do canal é de  $1,10 \times 10^{-3}$  m/m.

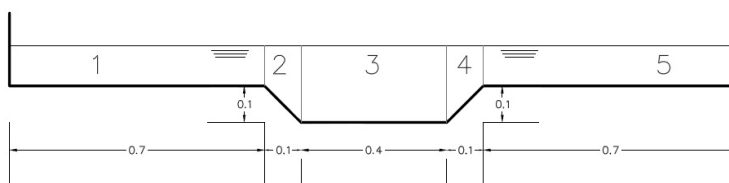


Figura 3.1: Canal Veiga da Cunha, LNEC

Na Figura 3.2 é mostrada uma fotografia geral do canal.



Figura 3.2: Canal Veiga da Cunha, LNEC (retirada de Duarte, 2011)

A instalação experimental CVC, permite obter dados de simulações de cheias de rios, nas quais o leito principal fica totalmente preenchido, passando o escoamento a processar-se tanto em leito principal como em leito de cheia dando origem a um escoamento em secção composta. Este canal tem a capacidade de injectar caudais individuais para cada leito, de modo a que se consigam obter escoamentos uniformes sem ser necessário um canal de grande comprimento. As medições foram efectuadas a uma distância de 7,5 m da zona de injeção, de modo a ser garantido que o escoamento se desenrola em regime uniforme. Na Figura 3.3, adaptada de Duarte (2011) é mostrado um esquema da secção onde foram medidos os dados utilizados.

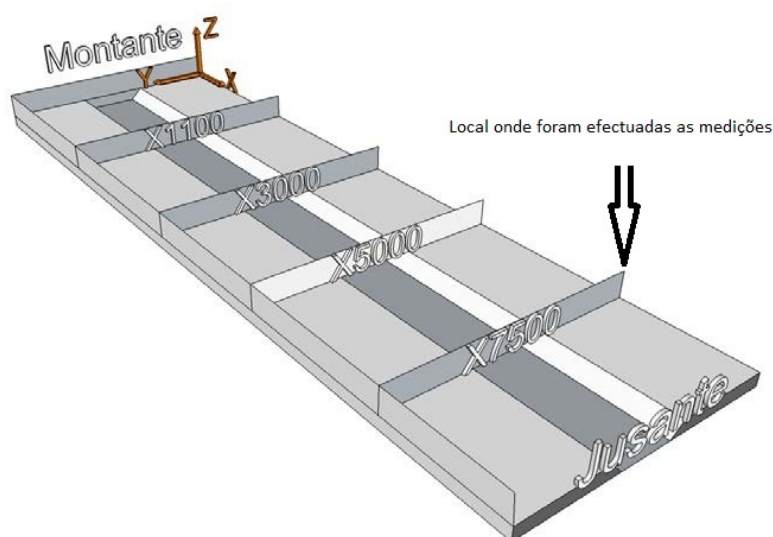


Figura 3.3: Secções transversais e eixos do canal (adaptada de Duarte, 2011)

O caudal introduzido é regulado e medido com uma precisão de 0,1 l/s, por dois

caudalímetros instalados nas tubagens de alimentação de água provenientes do reservatório elevado.

Para efectuar medições de velocidades junto ao fundo, foi utilizado um Tubo de Pitot que, para além de ser um equipamento fácil de manusear, permite realizar medições bastante próximas do fundo do canal.

A recolha de dados de velocidade para as diversas alturas relativas estudadas foram medidas através de um velocímetro, denominado de Vectrino. Este equipamento permite medir velocidades instantâneas dentro de água recorrendo ao efeito Doppler (Duarte, 2011).

### 3.2 Procedimento de calibração

Os dados utilizados, resultantes dos ensaios realizados por Pinto (2010), Massa (2011) e Teixeira (2011) na instalação experimental, incluíam as velocidades médias temporais segundo as direcções longitudinal e transversal, as tensões de Reynolds e as tensões de arrastamento para as alturas relativas de 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,30 e 0,38. A metodologia de cálculo que permite calcular os parâmetros de calibração do modelo SKM foi idêntica para todas as alturas relativas estudadas. Assim sendo, optou-se por apresentar essa metodologia apenas para a altura relativa de 0,30, apresentando-se os resultados resumidos para as restantes alturas relativas estudadas no capítulo 4 da presente dissertação.

As séries temporais de velocidade foram tratadas com um filtro, proposto por Goring e Nikora (2002) que consiste na eliminação de pontos erróneos pelos autores mencionados no parágrafo anterior.

Antes de se explicar o processo de calibração implementado, importa resumir algumas variáveis que influem no comportamento deste escoamento. As variáveis são a altura de escoamento no LC e no LP,  $H_{LC}$  e  $H_{LP}$ , respectivamente, e encontram-se resumidas na Tabela 3.1.

Altura relativa, $h_r$	$H_{LP}(m)$	$H_{LC}(m)$
0,10	0,110	0,010
0,15	0,120	0,020
0,20	0,125	0,025
0,25	0,130	0,030
0,30	0,140	0,040
0,38	0,160	0,060

Tabela 3.1: Alturas de água nos painéis da secção para as alturas relativas estudadas

De seguida, são apresentadas na Tabela 3.2 algumas considerações tomadas neste estudo,

$S_0(m/m)$	0.0011
$v$	$1 \times 10^{-6}$
$\rho(kg/m^3)$	1000
$g(m/s^2)$	9.81

Tabela 3.2: Considerações gerais adoptadas

Tendo em conta a geometria simétrica do canal e de acordo com Shiono e Knight (1991), a velocidade transversal média em profundidade,  $V_d$ , deverá ser nula no centro do canal, para  $y = 0m$ . Nas séries de dados estudadas, tal não acontecia, devido ao facto do aparelho de medição (Vectrino) não estar perfeitamente alinhado. Tornou-se então necessário calcular o ângulo de erro do aparelho e corrigir os dados de modo a que, no centro do canal,  $V_d = 0$ . Tendo isto em consideração, o primeiro passo tomado consiste em calcular a velocidade transversal média em profundidade para  $y = 0m$ , ou seja, para o eixo de simetria do canal, e verificar se a integração em profundidade da componente transversal da velocidade é nula. Se  $V_d(y = 0) \neq 0$ , então calcula-se um ângulo de correcção que permita obter  $V_d(y = 0) = 0$  e corrigem-se todos os valores de velocidade,  $U$  e  $V$  em todos os pontos de medição com base no ângulo calculado.

Apresentadas algumas considerações iniciais e efectuadas as correcções nos dados, foi possível iniciar o processo de cálculo dos parâmetros de calibração do modelo SKM. O primeiro parâmetro a ser calculado foi o parâmetro da resistência de fundo,  $f$ .

O parâmetro de resistência do fundo,  $f$ , foi obtido aplicando a equação 3.1.(ver Shiono e Knight, 1991).

$$f = \frac{8\tau_0}{\rho U_d^2} \quad (3.1)$$

Esta equação depende da tensão de arrastamento, que faz parte dos dados retirados de Fernandes *et al.* (2011) e, da velocidade longitudinal média em profundidade,  $U_d$ . A velocidade longitudinal média em profundidade é calculada aplicando a equação (3.2) a todas as verticais de medições.

$$U_d = \frac{1}{H} \int_0^H U \, dz. \quad (3.2)$$

A variação da velocidade longitudinal média em profundidade, para  $h_r = 0,30$ , é mostrada na Figura 3.4 e a sua distribuição encontra-se dentro do esperado, tendo em consideração os resultados obtidos por Shiono e Knight (1991). A velocidade é maior na zona mais profunda da secção, LP, e vai diminuindo ao longo do painel de transição, existindo um elevado gradiente de velocidade nessa zona, até que estabiliza numa velocidade inferior no LC.

A tensão de arrastamento foi calculada a partir da velocidade junto ao fundo aplicando a equação (2.15). Esta velocidade foi medida com recurso ao tubo de Pitot (ver Massa, 2011). Esta tensão faz parte dos dados retirados de Fernandes



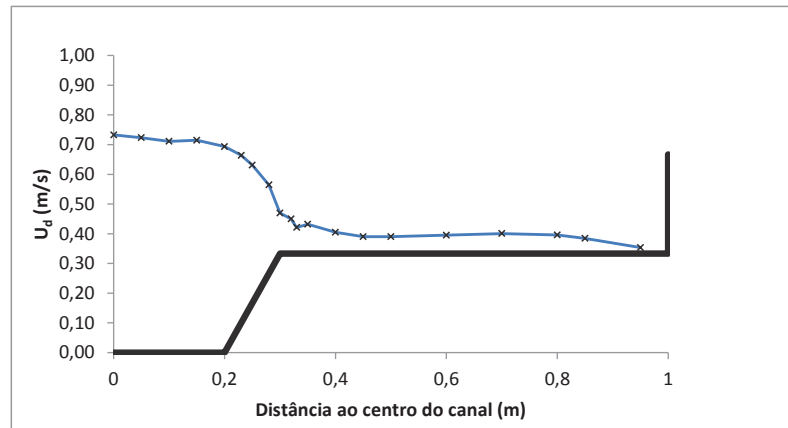


Figura 3.4: Perfil das velocidades em perfil transversal para  $h_r = 0,30$

*et al.* (2011) e não necessita de nenhum tratamento, podendo ser consultada na Figura 3.5.

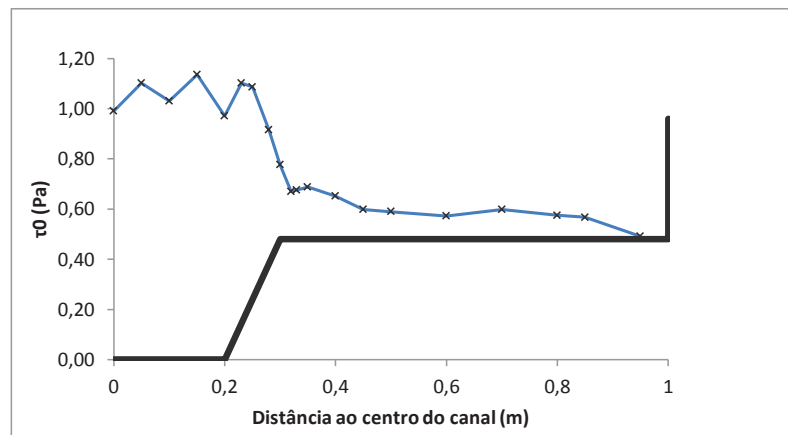


Figura 3.5: Perfil transversal da tensão de arrastamento para  $h_r = 0,30$

A distribuição de  $\tau_0$  para  $h_r = 0,30$ , apresenta um perfil expectável, sendo possível efectuar uma melhor comparação entre a distribuição de  $\tau_0$ , obtida para  $h_r = 0,25$ , e a distribuição obtida por Shiono e Knight (1991), para a mesma altura relativa, como se pode observar na Figura 3.6.

Após o cálculo de  $U_d$ , conhecendo os valores de  $\tau_o$  e, admitindo que  $\rho$  toma o valor de  $1000 \text{ kg/m}^3$ , é possível obter-se a distribuição transversal do parâmetro de calibração relativo à resistência de fundo,  $f$ , aplicando a equação (3.1). A distribuição transversal obtida é apresentada na Figura 3.7.

O parâmetro que define a viscosidade turbulenta, parâmetro  $\lambda$ , descreve a mistura lateral que ocorre no canal, com especial importância na zona referente à camada de mistura onde, devido ao elevado gradiente de velocidades, se desenvolve uma

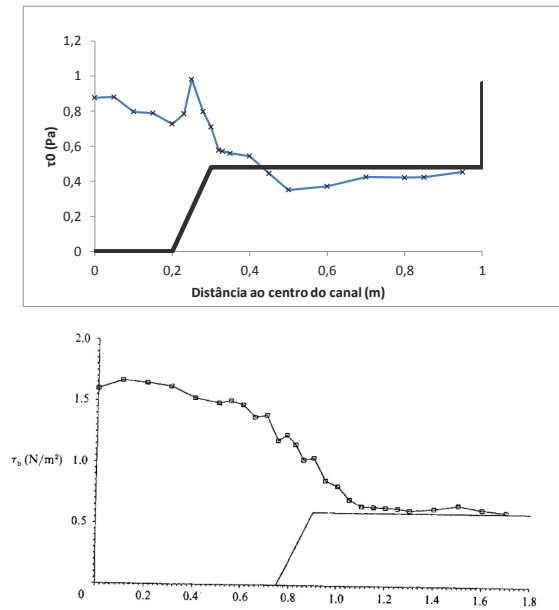


Figura 3.6: Comparação entre os valores de  $\tau_0$  obtidos no CVC e os obtidos por Shiono e Knight (1991)

grande instabilidade, provocando vórtices de eixo vertical com uma ampla gama de tamanhos que retiram energia ao escoamento.

O valor deste parâmetro para uma qualquer vertical ao longo da secção transversal, obtém-se aplicando a seguinte equação.

$$\lambda = \frac{(\tau_{yx})_d}{\rho H u_* \frac{\partial U_d}{\partial y}} \quad (3.3)$$

Este parâmetro depende das tensões de Reynolds médias em profundidade,  $(\tau_{yx})_d$ , da altura de água,  $H$ , da velocidade de atrito junto ao fundo,  $u_*$ , e da variação transversal da velocidade longitudinal média em profundidade,  $\frac{\partial U_d}{\partial y}$ . A altura de água no escoamento e a velocidade de atrito junto ao fundo são dados retirados de Fernandes *et al.* (2011). Os dados relativos às tensões de Reynolds foram também, retirados de Fernandes *et al.* (2011), sendo que, de acordo com a equação proposta em Shiono e Knight (1991), é necessário proceder ao cálculo da sua média em profundidade. Para isso aplicou-se a equação seguinte.

$$(\tau_{yx})_d = \frac{1}{H} \int_0^H \tau_{yx} dz. \quad (3.4)$$

A distribuição transversal de  $(\tau_{yx})_d$  é apresentada na Figura 3.8 e, analisando a mesma pode-se concluir que, na zona do painel de transição, existe uma grande variação de  $(\tau_{yx})_d$  devido ao elevado gradiente de velocidade verificado nessa zona.

O processo de obtenção da variação transversal da velocidade longitudinal média

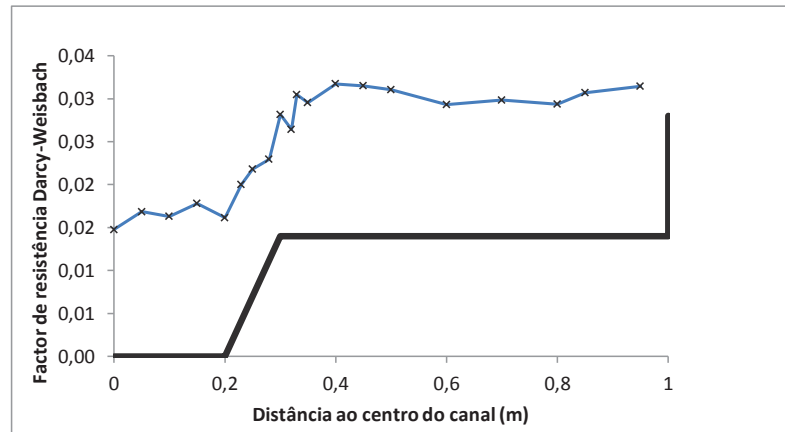


Figura 3.7: Perfil transversal do parâmetro de calibração da resistência de fundo,  $f$ , para  $h_r = 0,30$

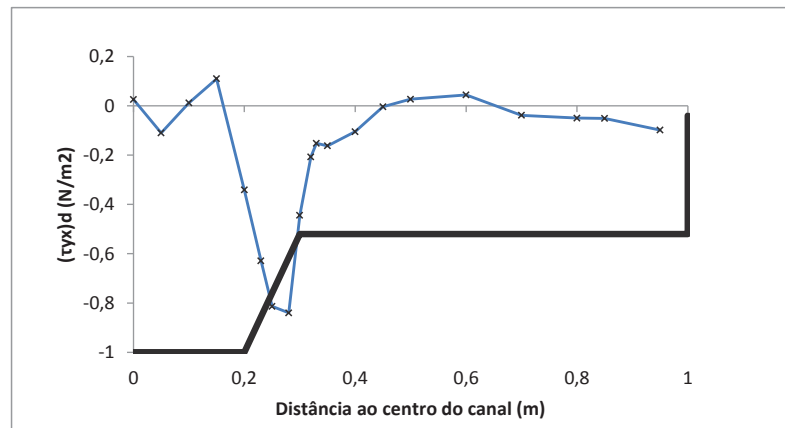


Figura 3.8: Perfil transversal da tensão de Reynolds média em profundidade para  $h_r = 0,30$

em profundidade utilizado nesta dissertação foi o mesmo aplicado em Shiono e Knight (1991) e consiste em aproximar um polinómio cúbico a cinco pontos consecutivos da distribuição transversal de  $U_d$ . Adicionalmente, tentou-se ajustar um polinómio interpolador de Lagrange de 2º grau a 3 pontos adjacentes. Os métodos aplicados devolveram variações bastante semelhantes entre eles, pelo que se optou por aplicar o polinómio de cúbico a cinco pontos consecutivos, como utilizado por Shiono e Knight (1991). Na Figura 3.9 é possível verificar o quão próximas ficam as distribuições de  $\frac{\partial U_d}{\partial y}$  para  $h_r = 0,30$ . As linhas tracejadas verticais que se podem observar na mesma figura correspondem aos limites da camada de mistura, cuja metodologia de cálculo pode ser consultada mais adiante, na secção 3.3 da presente dissertação.

Conhecidas as distribuições transversais na secção de  $(\tau_{yx})_d$  e de  $\frac{\partial U_d}{\partial y}$ , podem-se substituir estes termos na equação (3.3) e calcular o perfil na secção transversal do parâmetro da viscosidade turbulenta adimensional,  $\lambda$ . O perfil obtido pode ser

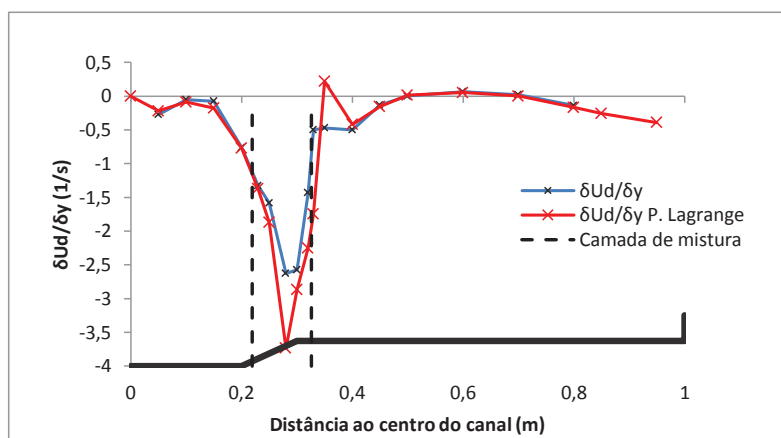


Figura 3.9: Perfil da variação transversal da velocidade longitudinal média em profundidade para  $h_r = 0,30$

consultado na Figura 3.10,

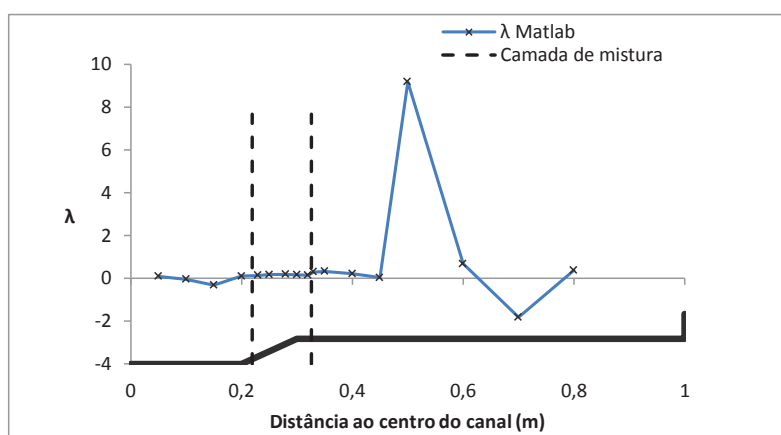


Figura 3.10: Perfil da variação transversal do parâmetro de calibração da viscosidade turbulenta adimensional,  $\lambda$ , para  $h_r = 0,30$

Dos três parâmetros de calibração do modelo SKM, o parâmetro das correntes secundárias,  $\Gamma$ , é o que apresenta maior dificuldade de calibração, pois depende das velocidades segundo a direcção longitudinal e transversal, sendo que esta última, possui valores muito pequenos comparativamente à primeira e, qualquer erro de medição ou de cálculo poderá, inclusive, mudar o sinal do parâmetro, levando a que o processo de obtenção do mesmo esteja sujeito a erros que afectem a veracidade dos resultados.

Com o objectivo de se melhor compreender a dificuldade em calibrar este parâmetro, fez-se uma comparação entre diferentes metodologias que permitem obter valores de  $\Gamma$ . Uma das metodologias baseia-se na aplicação da equação (3.5), designada “Metodologia A”, e a outra na aplicação da equação (3.6) designada “Metodologia B”.

$$\Gamma = \frac{\partial H \rho(UV)_d}{\partial y} \quad (3.5)$$

$$\Gamma = \rho g H S_0 - \tau_b \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}} + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yx})_d \quad (3.6)$$

A resolução da equação (3.5) é simples, sendo apenas necessário calcular o valor médio em profundidade do produto entre as velocidades médias longitudinal e transversal através da equação (3.7)

$$(UV)_d = \frac{1}{H} \int_0^H UV \, dz. \quad (3.7)$$

Para a resolução da equação (3.6), é necessário calcular a variação lateral da tensão de Reynolds média em profundidade e, para isso, aplica-se um polinómio cúbico a 5 pontos consecutivos, com recurso a uma rotina de MATLAB, à distribuição já apresentada na Figura 3.8. Todas as restantes variáveis foram anteriormente calculadas ou fornecidas por Fernandes *et al.* (2011).

Os resultados da calibração do parâmetro das correntes secundárias,  $\Gamma$ , são apresentados na Figura 3.11. A diferença entre os valores obtidos pelas duas metodologias demonstra a dificuldade de obtenção de um valor fiável para este parâmetro.

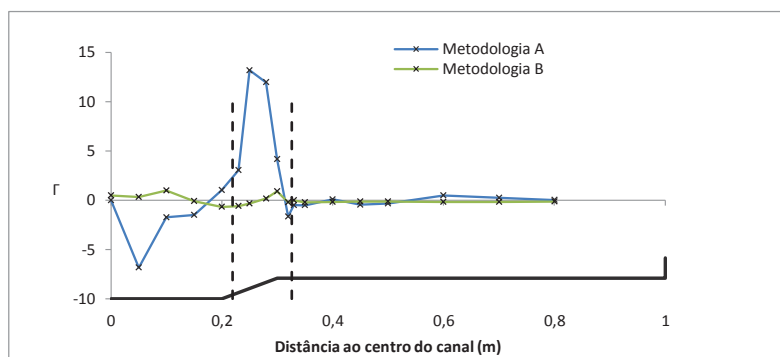


Figura 3.11: Perfil da distribuição do parâmetro das correntes secundárias calculada por dois métodos, para  $h_r = 0,30$

Este processo foi repetido para todas as alturas relativas em estudo e os resultados apresentaram grandes diferenças entre as metodologias.

Mais adiante nesta dissertação serão apresentados os resultados da distribuição da velocidade longitudinal média em profundidade aplicando cada um dos parâmetros de calibração  $\Gamma$  calculados nesta secção a partir das metodologias apresentadas, para  $h_r = 0,30$ .

### 3.3 Camada de mistura

Na origem da camada de mistura está o gradiente de velocidade que existe na interface entre o LP e o LC. Esta camada é caracterizada como sendo uma zona de tensões transversais que resultam da interacção directa entre o escoamento no LP e o escoamento no LC. Na Figura 3.12, pode ser observado o desenvolvimento dessa mesma camada de montante para jusante. Na zona a montante, a distribuição de velocidades para cada leito pode ser observada na Figura 3.12 a), onde se verifica que não existe interacção entre os escoamentos. À medida que o escoamento se movimenta para jusante, a distribuição de velocidade adopta o comportamento que pode ser observado na Figura 3.12 b), no qual, existe um alargamento da camada de mistura na zona de interacção entre os dois escoamentos. Devido a este comportamento, irá existir uma diminuição da velocidade no leito principal, e um aumento da mesma no leito de cheia (Duarte, 2011).

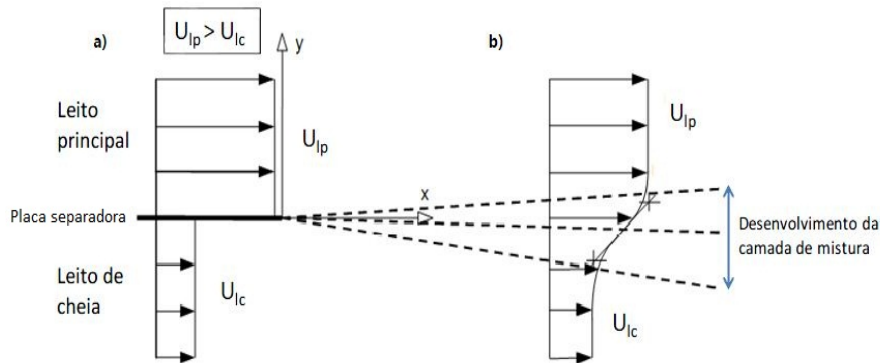


Figura 3.12: Desenvolvimento da camada de mistura na interface do leito principal e leitos de cheia para: a) Posição no início do canal; e b) Posição a jusante do início do canal (Adaptada de Nijs, 2003).

A definição desta camada de mistura tem relevância para a execução desta dissertação pois, como se verá na secção 4.3, os parâmetros de calibração relativos às correntes secundárias e à mistura lateral são obtidos tendo em consideração as dimensões da camada de mistura, sendo necessário calcular a largura e posições dos seus limites.

De acordo com Prooijen *et al.* (2005), o comprimento da camada de mistura pode ser calculado através do perfil de velocidades da secção transversal, aplicando para tal, a seguinte equação,

$$\delta = 2(y_{75\%} - y_{25\%}) \quad (3.8)$$

A distância entre  $y_{25\%}$ , onde  $U_{25\%} = U_{LC} + 0.25(U_{LP} - U_{LC})$ , e  $y_{75\%}$ , onde  $U_{75\%} = U_{LC} + 0.75(U_{LP} - U_{LC})$ , determina metade do comprimento da camada de mistura.

A equação (3.8), aplicada ao perfil transversal de velocidade longitudinal média em profundidade da respectiva altura relativa, devolve os comprimentos das camadas de mistura apresentada na Tabela 3.3 para as alturas relativas,  $h_r$ , estudadas.

<b>Altura relativa, <math>h_r</math></b>	<b><math>\delta(\text{m})</math></b>
0,10	0,103
0,15	0,104
0,20	0,102
0,25	0,091
0,30	0,107
0,38	0,209

Tabela 3.3: Largura da camada de mistura para as alturas relativas estudadas

Adoptou-se a metodologia proposta por Prooijen *et al.* (2005) pois, Massa (2011) concluiu ser a que melhores resultados apresentava para o CVC.





## Capítulo 4

# Resultados

Neste capítulo, são apresentados os gráficos dos resultados mais importantes, obtidos durante o processo de cálculo dos parâmetros de calibração do Modelo SKM.

### 4.1 Dados experimentais

O primeiro gráfico que importa analisar é o da velocidade longitudinal média em profundidade para todas as alturas relativas estudadas. Esta distribuição é mostrada na Figura 4.1.

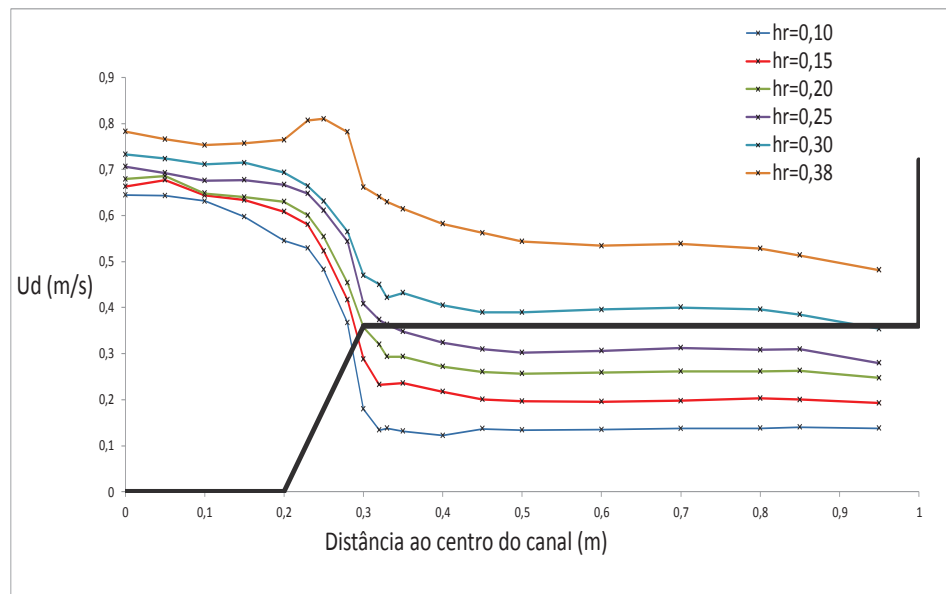


Figura 4.1: Perfil transversal da velocidade média em profundidade,  $U_d$ , para todas as alturas relativas estudadas

Analisando a figura, é fácil perceber que as velocidades aumentam com o aumento da altura relativa, em todas as zonas da secção transversal, como, aliás, seria

expectável. Por outro lado, esse aumento é maior no leito de cheia, resultando num menor gradiente lateral de velocidade. Assim, para as maiores alturas relativas, a turbulência na camada de mistura deve diminuir de intensidade.

Importa, também, mostrar o gráfico correspondente à distribuição das tensões de Reynolds médias em profundidade. Esta distribuição é mostrada na Figura 4.2.

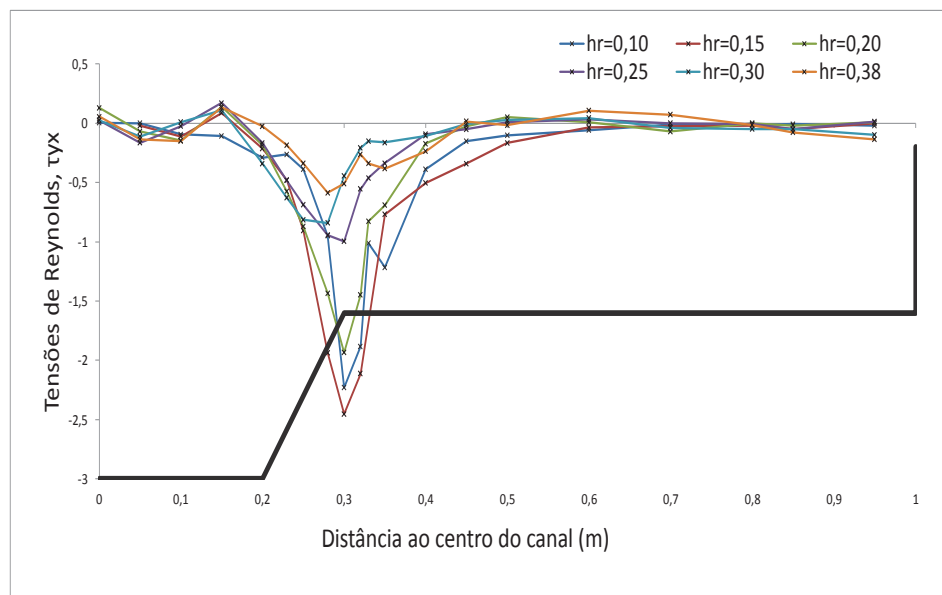


Figura 4.2: Perfil transversal das tensões de Reynolds médias em profundidade,  $(\tau_{yx})_d$ , para todas as alturas relativas estudadas

No gráfico, é possível observar que, na zona da interface, os valores da tensão de Reynolds são maiores, mas, também é possível verificar que, à medida que a altura relativa aumenta, as tensões de Reynolds diminuem. Este comportamento é facilmente explicado pela redução do gradiente lateral de velocidade já referido anteriormente na análise da Figura 4.1.

Importante será, também, analisar o comportamento das tensões de arrastamento para as alturas relativas estudadas ao longo da secção. A distribuição correspondente a este comportamento pode ser observada na Figura 4.3.

Da análise desta figura, verifica-se que a tensão de arrastamento aumenta de intensidade à medida que aumenta a sua altura relativa. É, também, possível observar que esta tensão diminui à medida que diminui a altura de água do escoamento, ou seja, à medida que a altura de água vai diminuindo conforme se passa do LP para o LC, também a tensão de arrastamento diminui. Este comportamento é facilmente explicado, quando se tem em consideração a influência que a velocidade junto ao fundo tem na tensão de arrastamento.

Na Figura 4.4 é apresentado o perfil de  $\frac{\partial U_d}{\partial y}$  ao longo da secção em estudo, para todas as alturas relativas estudadas.

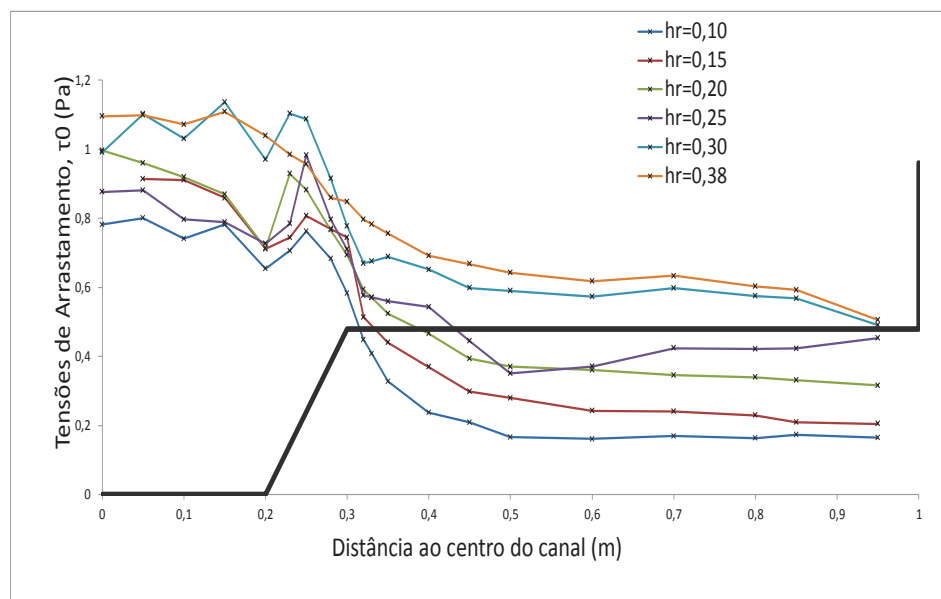


Figura 4.3: Perfil transversal das tensões de arrastamento,  $\tau_0$ , para todas as alturas relativas estudadas

Com a análise desta figura é fácil perceber, como já referido, que o gradiente de velocidade na zona da interface entre o LP e o LC diminui à medida que aumenta a altura relativa, ou seja, a velocidade média no LC aproxima-se da velocidade média no LP.

## 4.2 Parâmetros de calibração

### 4.2.1 Parâmetro da resistência de fundo, $f$

O parâmetro da resistência de fundo,  $f$ , permite contabilizar o atrito causado pelo fundo do leito e depende da tensão de arrastamento e da velocidade longitudinal média em profundidade. A distribuição obtida para este parâmetro, para todas as alturas relativas estudadas, é apresentada na Figura 4.5, que permite observar não só a distribuição na secção transversal mas, também, a sua variação com a altura relativa.

Analisando a Figura 4.5, verifica-se também que, para cada altura relativa, o parâmetro de calibração da resistência de fundo é sensivelmente constante no LP e no LC. Também pode ser observado o aumento do valor do parâmetro no LC relativamente ao valor no LP à medida que a altura relativa diminui. Este comportamento, observado também em Shiono e Knight (1991), deve-se, sobretudo, ao número de Reynolds em cada painel. É possível verificar que, para alturas relativas baixas, (e.g. 0,10), existe um pico junto à interface. Este pico não se deve a nenhum comportamento do escoamento, mas sim a erros registados pelo aparelho de medição devido à baixa altura de água para esta altura relativa.

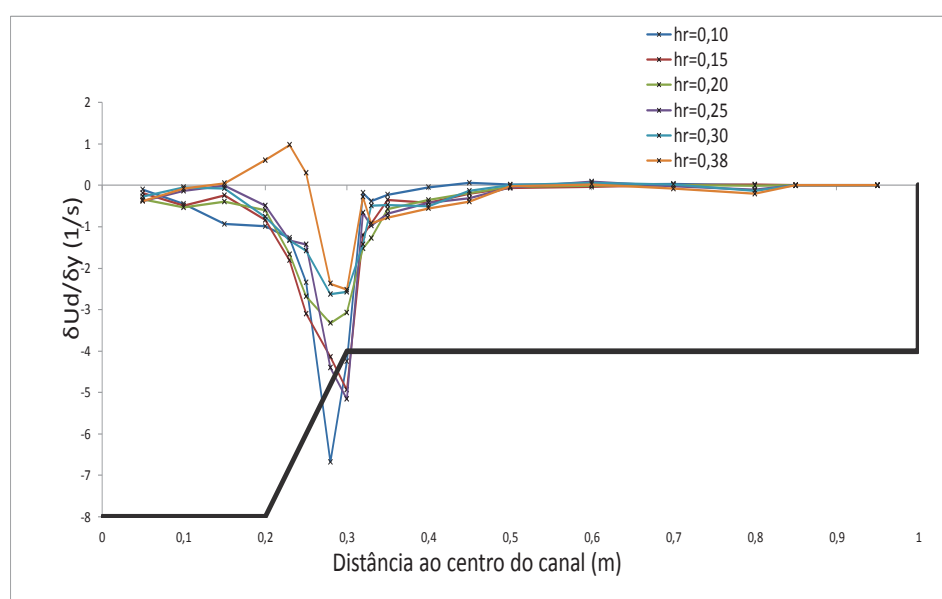


Figura 4.4: Perfil transversal de  $\frac{\partial U_d}{\partial y}$  para todas as alturas relativas estudadas

O parâmetro de calibração  $f$ , adopta um único valor para cada painel em que a secção se encontra dividida. Esse único valor para cada painel é obtido aplicando uma média ponderada a todos os pontos da distribuição obtida anteriormente, que estão contidos dentro desse painel. No caso do parâmetro  $f$ , essa divisão por painéis é efectuada de acordo com a geometria da secção. Na Figura 4.6 é possível observar o perfil obtido para  $h_r = 0,30$ , com uma recta por painel que representa a média ponderada dos valores desse mesmo painel.

Os valores médios obtidos para cada painel são resumidos na Tabela 4.1.

Altura relativa, $h_r$	Parâmetro $f$		
	Leito Principal	Painel de transição	Leito de cheia
0,10	0,01612	0,02844	0,08624
0,15	0,01657	0,02557	0,05214
0,20	0,01655	0,02350	0,04020
0,25	0,01407	0,01852	0,03635
0,30	0,01639	0,02092	0,03031
0,38	0,01483	0,01167	0,01675

Tabela 4.1: Valores de  $f$  obtidos pelo procedimento experimental

De seguida, é feita uma comparação entre os valores obtidos para o parâmetro  $f$  a partir dos dados experimentais, com os valores que seriam expectáveis de se obter se se tivesse seguido o recomendado por Shiono (2011), e se tivesse adoptado a equação de Colebrook-White (equação 4.1), para calcular o valor deste parâmetro. Importa, portanto, mostrar a referida equação. (Ver Parreira, 2011)

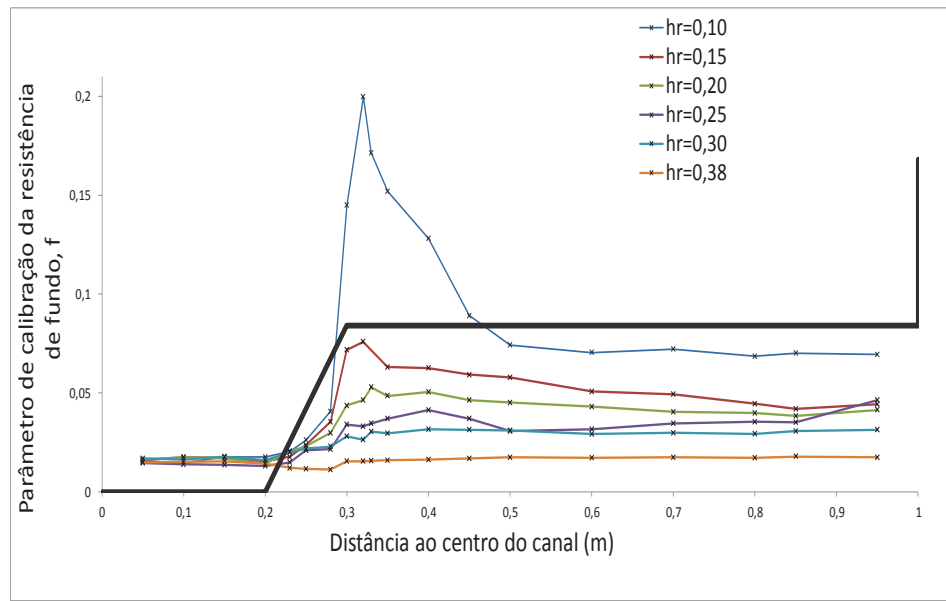


Figura 4.5: Perfil transversal do parâmetro  $f$  para todas as alturas relativas estudadas

$$f = \frac{1}{\left[ -2 \log \left( \frac{3.02v}{\sqrt{128gH^3S_0}} + \frac{k_s}{12.3H} \right) \right]^2} \quad (4.1)$$

Através da equação (4.1), é possível obter, facilmente, um valor de  $f$ , sendo necessário, apenas, a altura de água,  $H$ , a inclinação do fundo do canal,  $S_0$ , o valor de rugosidade absoluta e a viscosidade cinemática da água,  $\nu$ . A rugosidade absoluta,  $k_s$ , é obtida recorrendo à equação (4.2), proposta por Sturm (2001), que relaciona o número de Manning com a rugosidade absoluta, que Pinto (2010) concluiu ser a que melhores resultados devolvia para o CVC.

$$k_s = \left( \frac{n}{0,0391} \right)^6 \quad (4.2)$$

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores do parâmetro  $f$  aplicando a equação de Colebrook-White, como proposto por Shiono (2011).

Para melhor se analisarem as diferenças entre os valores obtidos pelo procedimento de calibração apresentado no capítulo anterior e os valores obtidos com a aplicação da equação de Colebrook-White, colocaram-se ambos sob a forma gráfica que pode ser consultada nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, correspondentes, respectivamente, ao LP, painel de transição e LC.

Os valores obtidos a partir do procedimento descrito anteriormente e os valores obtidos aplicando a equação de Colebrook-White, apresentam algumas diferenças sobretudo no LC para alturas relativas baixas.

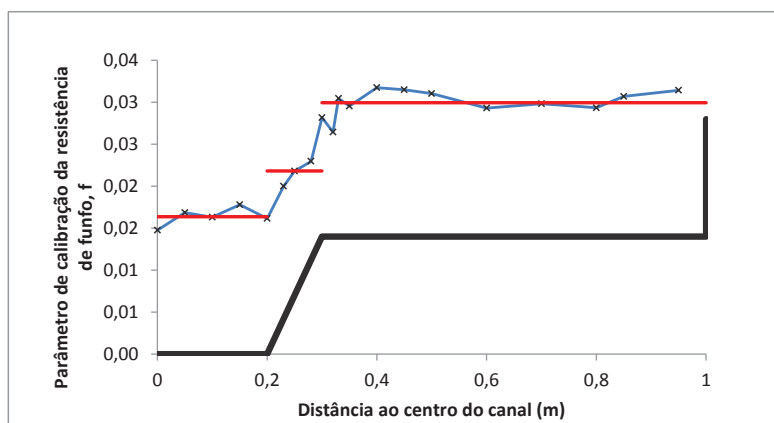


Figura 4.6: Perfil transversal do parâmetro  $f$  e valor médio para cada painel para  $h_r = 0,30$

Altura relativa, $h_r$	Parâmetro $f$		
	Leito Principal	Painel de transição	Leito de cheia
0,10	0,01450	0,02587	0,03724
0,15	0,01411	0,02056	0,02701
0,20	0,01394	0,01928	0,02461
0,25	0,01377	0,01832	0,02287
0,30	0,01346	0,01698	0,02049
0,38	0,01293	0,01532	0,01771

Tabela 4.2: Valores de  $f$  por Colebrook-White

Em Shiono e Knight (1991), é proposta uma equação que traduz a relação entre o valor do parâmetro  $f$  adoptado para o LP e o valor adoptado para o LC. Em Knight e Abril (1996), é proposta uma nova equação para traduzir a mesma relação. As equações são:

$$\frac{f_{LC}}{f_{LP}} = -0,1065 + 0,8893h_r^{\frac{3}{7}} \quad (\text{Shiono e Knight, 1991})$$

$$\frac{f_{LC}}{f_{LP}} = (1 - 0,331) + 0,331h_r^{-0,719} \quad (\text{Knight e Abril, 1996})$$

Na Figura 4.10 são colocadas, graficamente, as relações propostas pelas equações acima e a relação obtida a partir dos dados experimentais.

Da análise da Figura 4.10, é possível verificar que, para alturas relativas baixas, existe uma grande dispersão dos valores obtidos experimentalmente, em relação aos valores propostos pelas relações anteriormente mencionadas. Este comportamento deve-se ao aumento dos valores do parâmetro  $f$  no LC junto ao painel de transição.

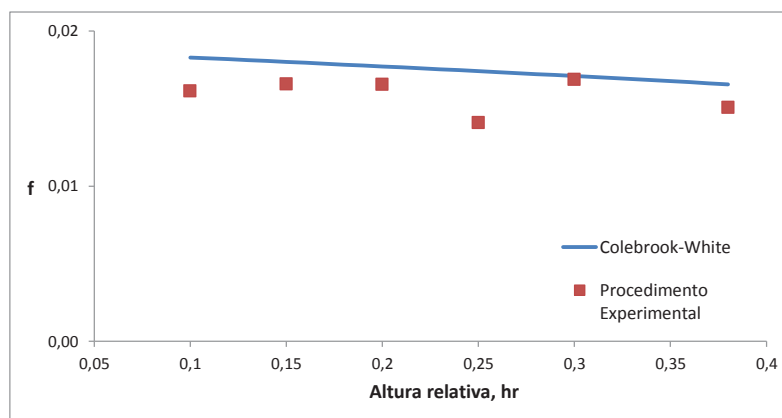


Figura 4.7: Comparação entre os valores de  $f$  obtidos experimentalmente e os valores obtidos aplicando a equação de Colebrook-White para o LP

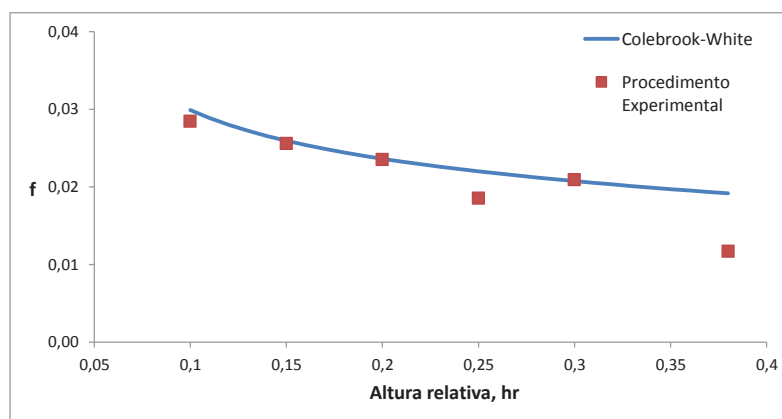


Figura 4.8: Comparação entre os valores de  $f$  obtidos experimentalmente e os valores obtidos aplicando a equação de Colebrook-White para o painel de transição

#### 4.2.2 Parâmetro da viscosidade turbulenta adimensional, $\lambda$

Os resultados da viscosidade turbulenta adimensional,  $\lambda$ , que descreve a mistura lateral que ocorre na zona de interação entre o LC e o LP, apresentam-se na Figura 4.11 para todas as alturas relativas estudadas. Nesta figura, apenas são considerados os resultados na zona do painel de transição, uma vez que a mistura lateral no LC e no LP é desprezável face à importância desta na zona da interface.

O parâmetro de calibração  $\lambda$  depende do gradiente de velocidade ao longo da secção (ver equação (3.3)). Logo, se se analisar o gradiente de velocidade, por exemplo, para  $h_r = 0,10$ , no leito de cheia, facilmente se percebe que não faz sentido tentar calcular o parâmetro nesta zona, pois, como os gradientes são muito próximos de zero, o cálculo irá devolver resultados bastante dispersos. Posto isto, optou-se por apresentar o valor de  $\lambda$  apenas dentro da camada de mistura e assumir que o mesmo, fora da camada de mistura, tomava os valores propostos

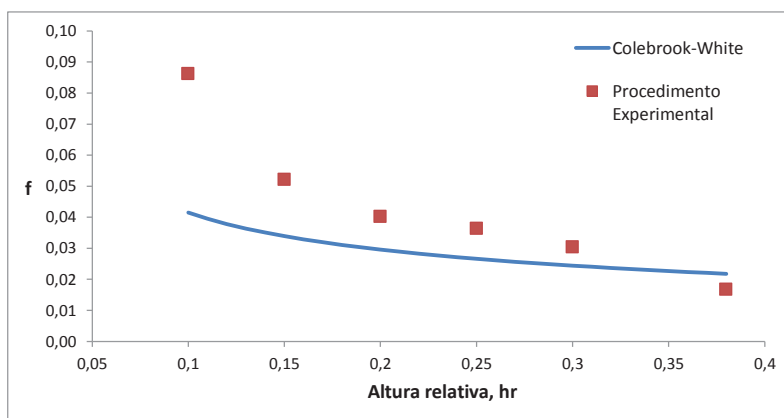


Figura 4.9: Comparação entre os valores de  $f$  obtidos experimentalmente e os valores obtidos aplicando a equação de Colebrook-White para o LC

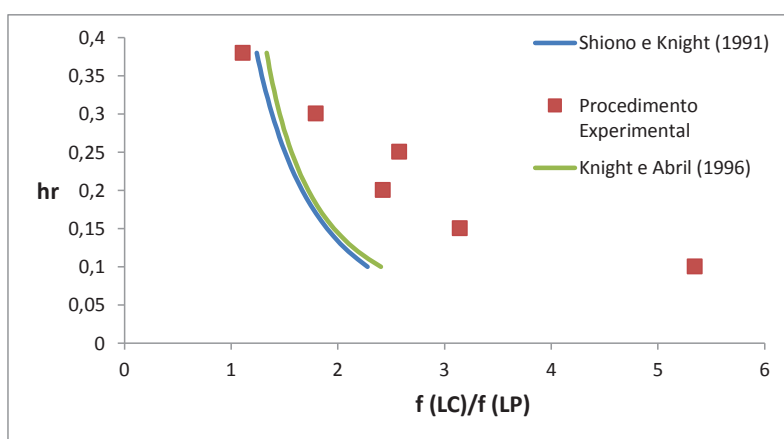


Figura 4.10: Relação  $\frac{f_{LC}}{f_{LP}}$

por Knight (1999) e por Ikeda (1981) já referidos na presente dissertação. Na Figura 4.12 é mostrado o perfil de  $\lambda$  na zona da camada de mistura para  $h_r = 0,30$ , com uma recta horizontal correspondente à media ponderada dos valores contidos dentro dessa camada de mistura.

De seguida é apresentada uma Tabela com o resumo dos valores obtidos para este parâmetro de calibração.

No LP considerou-se que  $\lambda$  adoptava o valor de 0,07 excepto para  $h_r = 0,30$  pois, para esta altura relativa o valor de  $\lambda = 0,07$  não apresentava resultados aceitáveis.

Interessa, portanto, comparar os valores obtidos neste processo de calibração com os valores propostos por Knight (1999) e por Ikeda (1981) para o parâmetro  $\lambda$ . Essa comparação é apresentada na Figura 4.13.

Os valores de  $\lambda$ , apesar de apresentarem um comportamento errático e difícil de definir, não se afastam muito dos valores propostos por Knight (1999).



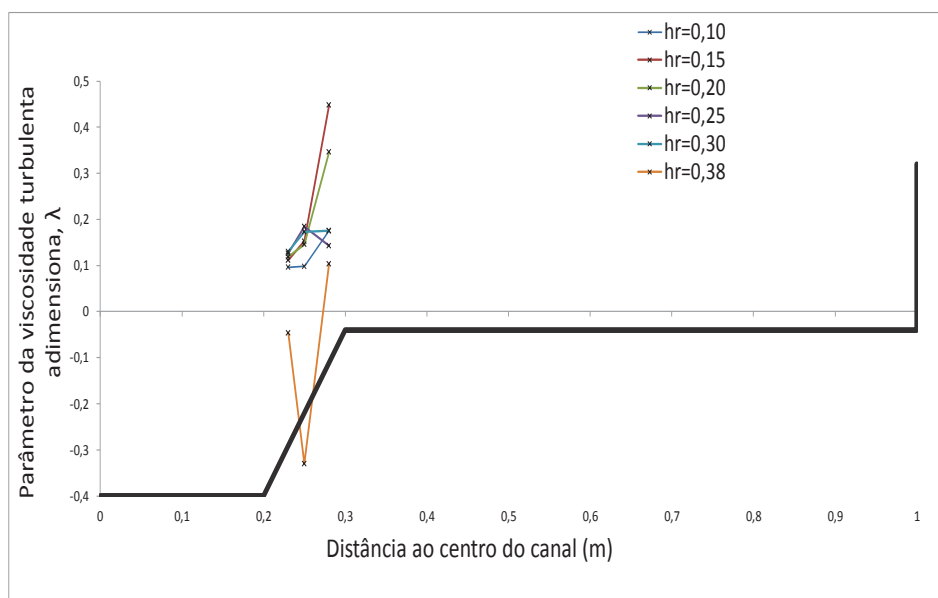


Figura 4.11: Perfil transversal do parâmetro  $\lambda$  para todas as alturas relativas estudadas

Altura relativa, $h_r$	Parâmetro $\lambda$		
	Leito Principal	Painel de transição	Leito de cheia
0,10	0,07000	0,13700	0,27000
0,15	0,07000	0,23480	0,27000
0,20	0,07000	0,20120	0,27000
0,25	0,07000	0,14190	0,13000
0,30	0,01400	0,14640	0,13000
0,38	0,07000	0,20240	0,13000

Tabela 4.3: Valores de  $\lambda$  obtidos pelo procedimento experimental

### 4.2.3 Parâmetro das correntes secundárias, $\Gamma$

O perfil obtido para a distribuição do parâmetro de calibração  $\Gamma$ , para todas as alturas relativas estudadas, é apresentado na Figura 4.14.

No caso deste parâmetro e para o cálculo da média ponderada, a divisão da secção de acordo com a sua geometria não faz muito sentido, pois dentro da camada de mistura o seu valor é desprezável, devido à insignificância das correntes secundárias em relação à mistura lateral registada nessa zona. Assim sendo, dividiu-se a secção em três painéis, delimitados pelas extremidades da camada de mistura considerou-se, tal como proposto por Abril e Knight (2004), que nesta zona,  $\Gamma = 0$ . (Ver Figura 4.15)

Na Tabela 4.4 são apresentadas as médias ponderadas de cada painel para cada altura relativa estudada. Estes valores, em conjunto com os das tabelas relativas aos outros dois parâmetros de calibração, foram os valores introduzidos na rotina

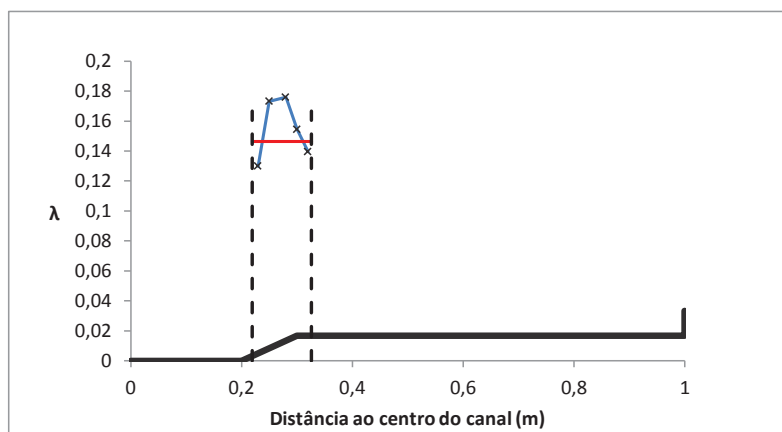


Figura 4.12: Perfil transversal do parâmetro  $\lambda$  e valor médio para cada painel para  $h_r = 0,30$

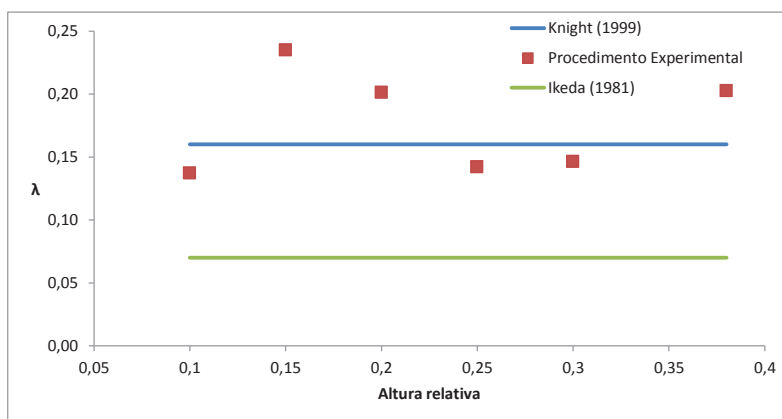


Figura 4.13: Comparação entre os valores de  $\lambda$  obtidos experimentalmente e os propostos por Knight (1999) e por Ikeda (1981)

de MATLAB que permitiu verificar se os parâmetros estavam correctamente calibrados ou não.

De seguida, os valores do parâmetro  $\Gamma$ , obtidos através do processo de calibração adoptado na execução desta dissertação, são comparados com os valores propostos em Abril e Knight (2004), cuja metodologia de obtenção pode ser consultada na secção 2.3.3 da presente dissertação. Os valores propostos por estes autores são apresentados na Tabela 4.5.

Para melhor se poder comparar os valores do parâmetro  $\Gamma$ , estes foram introduzidos sob a forma gráfica nesta dissertação e, podem ser consultados nas Figuras 4.16 e 4.17.

Pode concluir-se, através da análise da Figura 4.16, que os valores propostos em Abril e Knight (2004) para escoamentos no LP são, para todas as alturas relativas estudadas, inferiores aos valores obtidos nesta dissertação. Tal comportamento

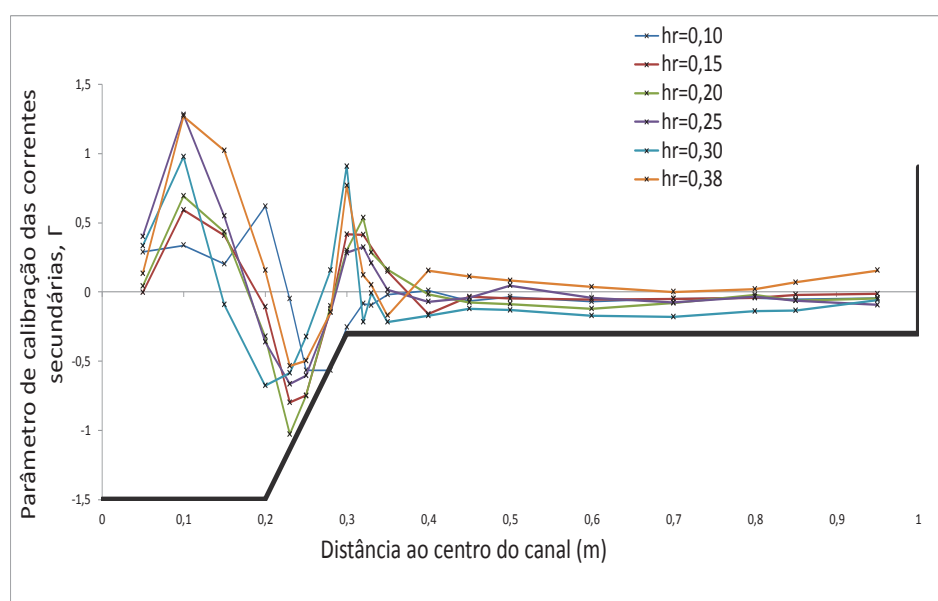


Figura 4.14: Perfil transversal do parâmetro  $\Gamma$  para todas as alturas relativas estudadas

Altura relativa, $h_r$	Parâmetro $\Gamma$		
	Leito Principal	Camada de mistura	Leito de cheia
0,10000	0,31990	0	-0,06951
0,15000	0,47940	0	-0,04871
0,20000	0,39060	0	-0,08022
0,25000	0,47480	0	-0,04652
0,30000	0,41010	0	-0,15736
0,38000	0,47900	0	0,041445

Tabela 4.4: Valores de  $\Gamma$  obtidos pelo procedimento experimental

pode ser interpretado de duas perspectivas distintas. Ou os dados utilizados se encontram com erros de medição ou de tratamento, ou as propostas para os valores de  $\Gamma$  feitas por Abril e Knight (2004) não se adequam ao canal em estudo. Esta última perspectiva deverá ser a que mais influencia a diferença registada anteriormente devido à diferença de dimensões entre o SERC e o CVC.

A Figura 4.17 demonstra que os valores obtidos nesta dissertação, não possuem um comportamento constante à medida que se aumenta a altura relativa, como acontece com os valores propostos em Abril e Knight (2004). Este comportamento vem confirmar a dificuldade em estimar, de forma correcta, este parâmetro de calibração do SKM.

Foi já, anteriormente, demonstrada a dificuldade de cálculo deste parâmetro de calibração, tendo inclusive, este processo sido efectuado por duas metodologias diferentes, que devolveram resultados bastantes distintos. Importa, portanto, estudar qual das duas metodologias utilizadas permite obter distribuições de

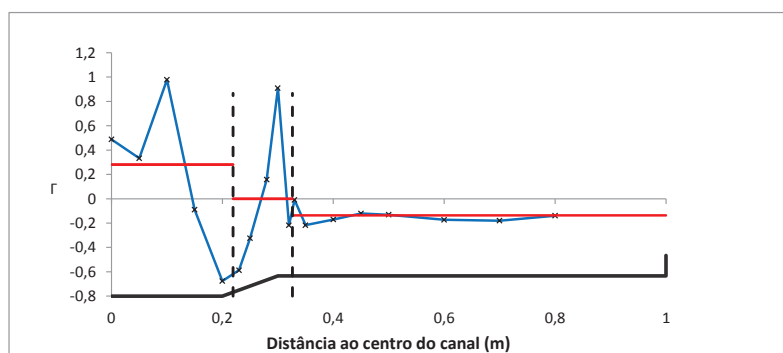


Figura 4.15: Perfil transversal do parâmetro  $\Gamma$  e valor médio para cada painel para  $h_r = 0,30$

Altura relativa, $h_r$	Parâmetro $\Gamma$		
	Leito Principal	Camada de mistura	Leito de cheia
0,10	0,1781	0	-0,02698
0,15	0,1942	0	-0,05396
0,20	0,2023	0	-0,06744
0,25	0,2104	0	-0,08093
0,30	0,2266	0	-0,10791
0,38	0,2590	0	-0,16187

Tabela 4.5: Valores de  $\Gamma$  propostos em Abril e Knight (2004)

velocidade mais próximas das obtidas através dos dados experimentais. Para tal foram introduzidos os parâmetros calculados numa rotina de MATLAB que, através da solução analítica do modelo SKM, devolve distribuições de velocidade. Os resultados obtidos apresentam-se nas Figuras 4.18 e 4.19.

Pode-se concluir, através da análise da Figura 4.18, que a distribuição calculada através da Metodologia A para o parâmetro de calibração  $\Gamma$ , não apresenta resultados aceitáveis.

Analisando a Figura 4.19, é possível concluir que existe uma aproximação bastante aceitável entre os valores da distribuição da velocidade obtidos através dos parâmetros calculados pela Metodologia B e os dados experimentais. Posto isto, foram adoptados os resultados obtidos através desta metodologia para calibrar o SKM.

Observando com mais detalhe a Figura 4.14, é possível concluir que o comportamento do escoamento, no que toca a correntes secundárias, apresenta semelhanças para todas as alturas relativas estudadas.

Partindo do andamento do parâmetro  $\Gamma$ , apresentado na Figura 4.14, é possível atribuir um sentido à rotação dos vórtices de eixo horizontal presentes no escoamento. De acordo com Knight *et al.* (2007), quando o sinal do parâmetro das correntes secundárias,  $\Gamma$ , é negativo, existe um vórtice com sentido de rotação

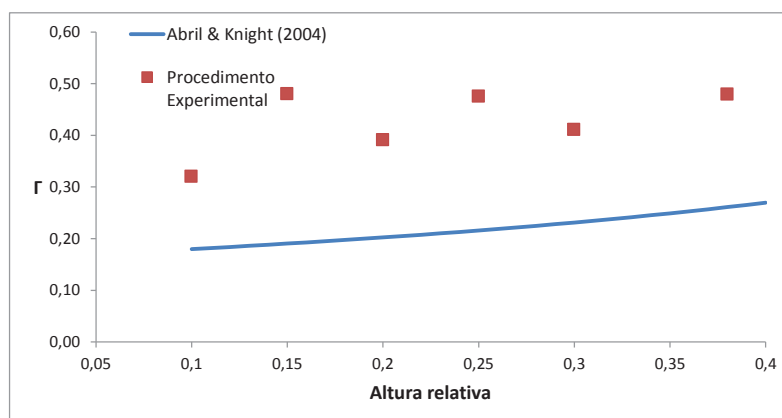


Figura 4.16: Comparação entre os valores de  $\Gamma$  propostos em Abril e Knight (2004) e os obtidos nesta dissertação para o LP

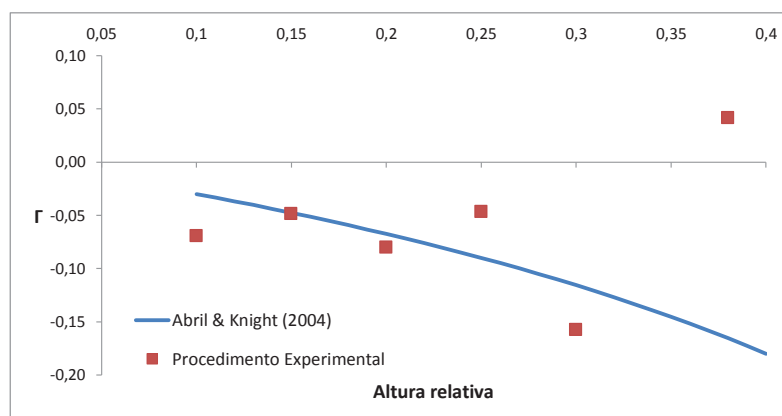


Figura 4.17: Comparação entre os valores de  $\Gamma$  propostos por Abril e Knight (2004) e os obtidos nesta dissertação para o LC

contrário aos ponteiros do relógio e quando o sinal do mesmo parâmetro é positivo, existe um vórtice com rotação no sentido dos ponteiros do relógio. Sendo assim, é possível saber onde ocorrem esses vórtices e qual o sentido de rotação que estes tomam. A representação gráfica prevista da posição e sentido de rotação destas estruturas é apresentada na Figura 4.20.

A posição e sentido de rotação representados na figura, são apenas a título esquemático, uma vez que as posições e intensidade das correntes secundárias variam com a altura relativa.

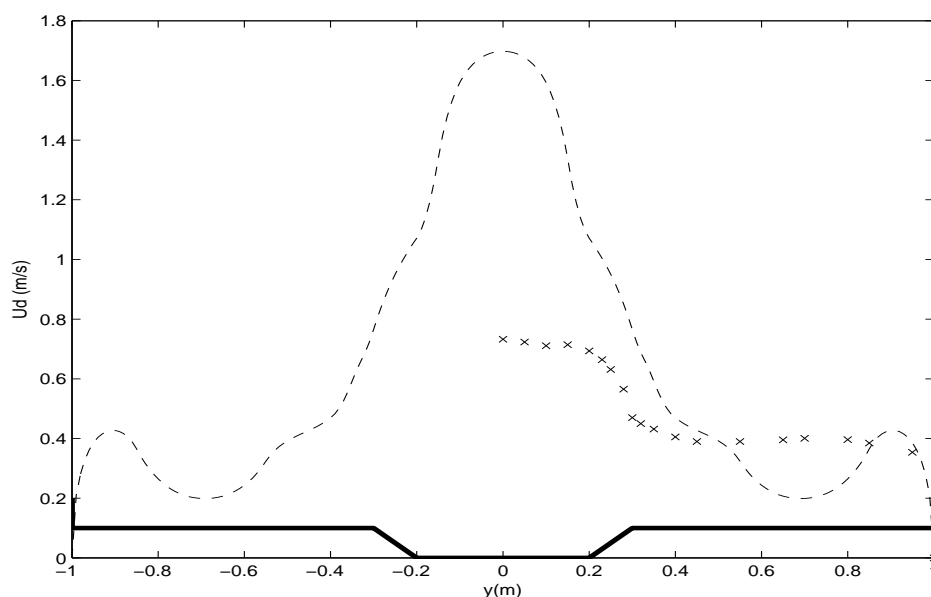


Figura 4.18: Perfil da velocidade longitudinal média em profundidade,  $U_d$ , para  $h_r = 0,30$ , resultante da rotina de MATLAB, com o parâmetro  $\Gamma$  calculado pela Metodologia A

### 4.3 Validação dos parâmetros

#### 4.3.1 Considerações gerais

Para se obter uma verificação da validade dos resultados obtidos para os parâmetros de calibração, foi utilizada, nesta dissertação, uma rotina de MATLAB, escrita por Parreira (2011), que aplica a solução analítica do SKM. Esta rotina sofreu alterações, com o objectivo de se obter uma maior precisão de resultados, pelo autor desta dissertação. As alterações efectuadas na rotina consistiram no aumento do número de subdivisões da secção de acordo com a alteração do sinal do parâmetro das correntes secundárias segundo Knight *et al.* (2007). Na secção seguinte é abordada a aplicação da solução analítica do SKM ao canal em estudo.

#### 4.3.2 Aplicação da solução analítica do SKM ao CVC

A solução analítica do modelo SKM foi proposta por Shiono e Knight (1989 e 1991). Esta solução é obtida dividindo a secção do canal em painéis, segundo a geometria do canal, ou seja, dividindo o canal de acordo com a inclinação transversal do fundo. Pode, ainda, aumentar-se a precisão dos resultados obtidos subdividindo os painéis pois, desta forma, é possível obter-se uma melhor definição das células de escoamento secundário, de acordo com o proposto por Knight *et al.* (2007). Para a altura relativa demonstrada, a divisão da secção foi feita em 9 painéis.

Na Figura 4.21 é possível observar uma possível divisão do CVC para

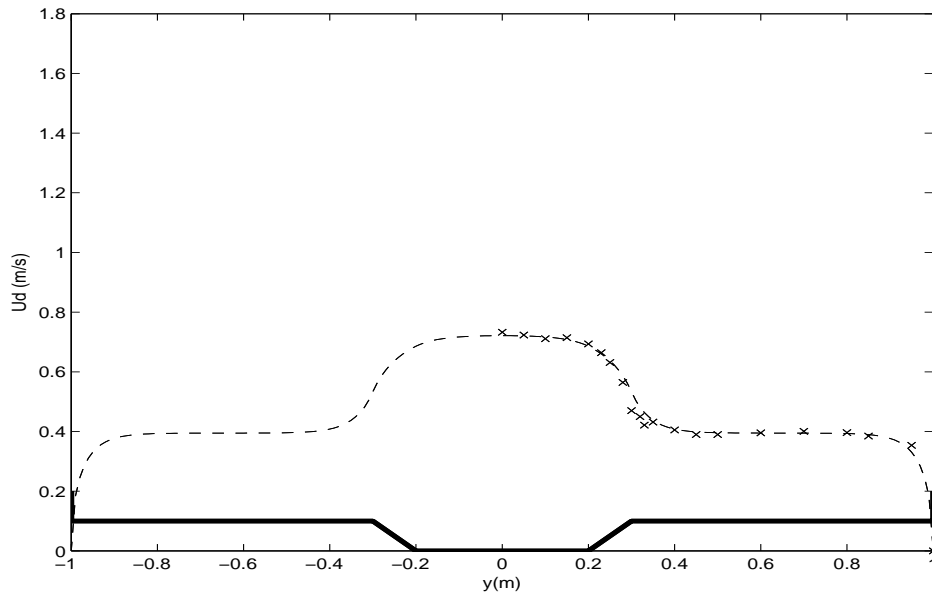


Figura 4.19: Perfil da velocidade longitudinal média em profundidade,  $U_d$ , para  $h_r = 0,30$ , resultante da rotina de MATLAB, com o parâmetro  $\Gamma$  calculado pela Metodologia B

aplicação do SKM. (Para mais detalhes, consultar Parreira, 2011) A obtenção da distribuição transversal da velocidade longitudinal em profundidade,  $U_d$ , e da tensão de arrastamento são conseguidas aplicando as equações (2.21) e (2.25), respectivamente, para profundidades constantes e para profundidades variáveis. A aplicação destas mesmas equações implica a correcta definição das constantes  $C_i$ , que se obtêm calculando as condições de fronteira do modelo.

### Condições de fronteira

Para que se torne possível obter uma solução utilizando o SKM, é necessário a aplicação das condições de fronteira entre painéis adjacentes e nos limites do canal. As condições de fronteira propostas por Shiono e Knight (1991), para dois painéis adjacentes, são:

- Continuidade da velocidade entre painéis

$$(U_d)_i = (U_d)_{i+1} \quad (4.3)$$

- Continuidade da tensão de arrastamento aparente

$$[H\tau_{yx}]_i = [H\tau_{yx}]_{i+1} \quad (4.4)$$

- Continuidade do gradiente de velocidade entre painéis

$$\left(\frac{\partial U_d}{\partial y}\right)_i = \left(\frac{\partial U_d}{\partial y}\right)_{i+1} \quad (4.5)$$

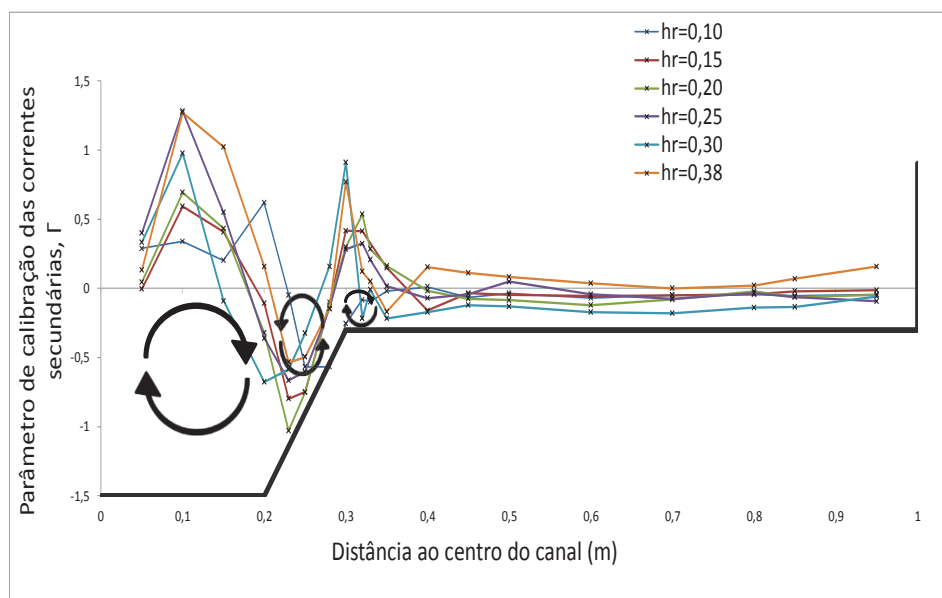


Figura 4.20: Perfil transversal do parâmetro  $\Gamma$  para todas as alturas relativas estudadas

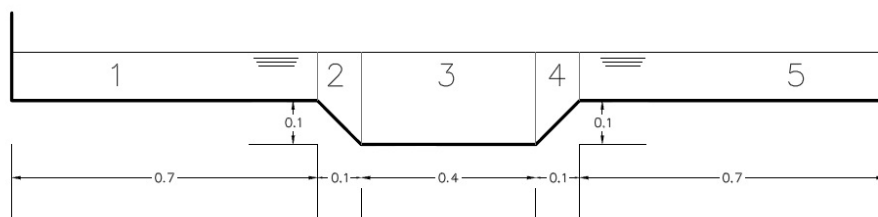


Figura 4.21: Canal Veiga da Cunha, LNEC

No caso dos painéis de extremidade, foi proposto por Shiono e Knight (1991) a condição de não escorregamento nos limites do canal, o que implica que  $U_d = 0$  junto dessas mesmas extremidades.

Dada a simetria do canal em estudo, o SKM pode ser aplicado em apenas metade da secção, reduzindo desta forma o esforço computacional e permitindo um aumento do número de divisões dos painéis com consequente melhor definição das células de escoamento secundário. A divisão da secção, junto do seu eixo de simetria, torna necessária a aplicação de uma condição que assume que a velocidade média em profundidade, segundo a direcção transversal  $V_d$ , seja nula nesse mesmo eixo.

No eixo de simetria, de modo a garantir a continuidade, é aplicada a seguinte condição de fronteira:



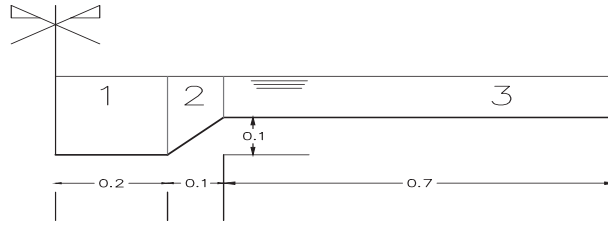


Figura 4.22: Seção transversal simétrica do CVC

$$\frac{\partial(HU_d)_i}{\partial y} = 0 \quad (4.6)$$

Considerando a divisão do canal apresentada na Figura 4.22, no ponto junto ao limite esquerdo do canal, junto do eixo de simetria, impõe-se a condição definida pela equação anterior. Aplicando a equação (2.21), na equação anterior e elevando ao quadrado para retirar a raiz, obteve-se a equação seguinte,

$$\frac{\partial HU_d}{\partial y} = 0 \Rightarrow \frac{\partial HU_d^2}{\partial y} = 0 \Rightarrow \gamma_1 C_1 - \gamma_2 C_2 = 0 \quad (4.7)$$

Na zona de transição entre a zona 1 e a zona 2, aplica-se a condição de continuidade da velocidade entre painéis dada pela equação (4.3). Tendo em atenção que, a zona 2 é uma zona com profundidade linearmente variável, aplicam-se as equações (2.25) e (2.21) à condição de continuidade da velocidade entre painéis adjacentes,

$$U_{d1}|_{y=0,2} = U_{d2}|_{y=0,2} \Rightarrow C_1 e^{0,2\gamma_1} + C_2 e^{0,2\gamma_1} - C_3 \zeta^\alpha - C_4 \zeta^{-(\alpha+1)} = \omega \zeta + \eta - K_1 \quad (4.8)$$

É aplicada, ainda, a condição da continuidade do gradiente de velocidade entre painéis, dada pela equação (4.5), que se eleva ao quadrado para se retirar a raiz ficando,

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_{d1}}{\partial y}|_{y=0,2} &= \frac{\partial U_{d2}}{\partial y}|_{y=0,2} \Rightarrow \frac{\partial U_{d1}^2}{\partial y}|_{y=0,2} = \frac{\partial U_{d2}^2}{\partial y}|_{y=0,2} \Rightarrow \\ &C_1 \gamma_1 e^{0,2\gamma_1} + C_2 \gamma_1 e^{-0,2\gamma_1} - C_3 \frac{\partial \xi^\alpha}{\partial y}|_{y=0,2} - C_4 \frac{\partial \xi^{-(\alpha+1)}}{\partial y}|_{y=0,2} = \\ &= \frac{\partial(\omega_2)}{\partial y} \xi + \frac{\partial(\xi)}{\partial y} \omega + \frac{\partial(\eta)}{\partial y} - \frac{\partial(K_1)}{\partial y} \quad (4.9) \end{aligned}$$

Aplicando as mesmas condições de continuidade da velocidade entre painéis e de continuidade do gradiente de velocidade entre painéis fica,

$$U_{d2}|_{y=0,3} = U_{d3}|_{y=0,3} \Rightarrow$$

$$C_3\xi^\alpha + C_4\xi^{-(\alpha+1)} - C_5e^{0,3\gamma_3} - C_6e^{-0,3\gamma_3} = -\omega\xi - \eta + K_3 \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial U_{d2}}{\partial y}|_{y=0,3} = \frac{\partial U_{d3}}{\partial y}|_{y=0,3} \Rightarrow \frac{\partial U_{d2}^2}{\partial y}|_{y=0,3} = \frac{\partial U_{d3}^2}{\partial y}|_{y=0,3} \Rightarrow$$

$$C_3\frac{\partial(\xi^\alpha)}{\partial y}|_{y=0,3} + C_4\frac{\partial(\xi^{-(\alpha+1)})}{\partial y}|_{y=0,3} - C_5\gamma_3e^{0,3\gamma_3} + C_6\gamma_3e^{-0,3\gamma_3} =$$

$$-\frac{\partial(\omega)}{\partial y}\xi - \frac{\partial(\xi)}{\partial y}\omega - \frac{\partial(\eta)}{\partial y} + \frac{\partial(K_3)}{\partial y} \quad (4.11)$$

Aplicando a condição de não escorregamento para o limite direito do canal vem que:

$$U_{d3}|_{y=1} = 0 \Rightarrow U_{d3}^2|_{y=1} = 0 \Rightarrow C_5e^{\gamma_3} + C_6e^{-\gamma_3} = -K_3 \quad (4.12)$$

O método mais simples de obtenção das constantes  $C_i$ , passa por transformar as condições anteriores em matrizes, resultando então:

$$[T] \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \end{bmatrix} = [q] \quad (4.13)$$

Onde as matrizes  $T$  e  $q$  correspondem a:

$$[T] = \begin{bmatrix} \gamma & -\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{0,2\gamma_1} & e^{-0,2\gamma_1} & -\xi^\alpha & -\xi^{-\alpha} & 0 & 0 \\ \gamma_1 e^{0,2\gamma_1} & -\gamma_1 e^{-0,2\gamma_1} & \frac{\partial \xi^\alpha}{\partial y}|_{y=0,2} & -\frac{\partial \xi^{-(\alpha+1)}}{\partial y}|_{y=0,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi^\alpha & \xi^{-(\alpha+1)} & -e^{0,3\gamma_3} & -e^{-0,3\gamma_3} \\ 0 & 0 & \frac{\partial \xi^\alpha}{\partial y}|_{y=0,3} & \frac{\partial \xi^{-(\alpha+1)}}{\partial y}|_{y=0,3} & -\gamma e^{0,3\gamma_3} & \gamma e^{-0,3\gamma_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^\gamma & e^{-\gamma} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$[q] = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\xi + \eta - K_1 \\ \frac{\partial \omega}{\partial y}\xi + \frac{\partial \xi}{\partial y}\omega + \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial K_1}{\partial y} \\ -\omega\xi - \eta + K_3 \\ -\frac{\partial \omega}{\partial y}\xi - \frac{\partial \xi}{\partial y}\omega - \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial K_3}{\partial y} \\ -K_3 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Como já referido, a rotina utilizada para validar os parâmetros obtidos baseia-se na solução analítica do modelo SKM, descrita anteriormente. Para uma melhor análise dos gráficos obtidos a partir da rotina, foram introduzidos os dados experimentais da velocidade longitudinal média em profundidade. Os resultados obtidos da simulação para a altura relativa,  $h_r = 0,30$  são apresentados na Figura 4.23.

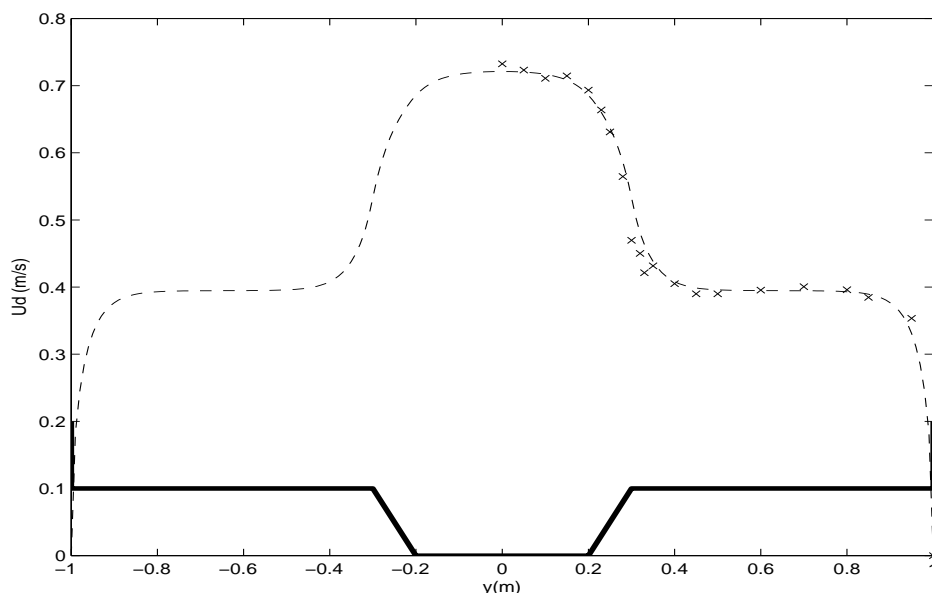


Figura 4.23: Validação dos parâmetros de calibração através da velocidade longitudinal para  $h_r = 0,30$

Analisando a figura pode-se concluir que os valores da velocidade longitudinal média em profundidade, obtidos a partir dos parâmetros de calibração calculados, se aproximam bastante dos dados experimentais medidos no CVC. Pode-se, então, concluir que estes parâmetros são válidos para  $h_r = 0,30$ .

Através da análise da Figura 4.24, referente à distribuição obtida para a tensão de arrastamento para a altura relativa  $h_r = 0,30$ , é possível concluir que a distribuição obtida apresenta resultados bastante satisfatórios quando se pretende ter uma noção da distribuição transversal da tensão de arrastamento.

O mesmo processo foi aplicado para todas as alturas relativas em estudo. Os resultados obtidos na rotina de MATLAB para todas as alturas relativas em estudo são apresentados nas Figuras 4.25 a 4.34.

Para  $h_r = 0,10$ , o perfil obtido é mostrado na Figura 4.25 e, como se pode verificar através da sua análise, o perfil obtido com os parâmetros calculados pelo método anteriormente demonstrado aproxima-se bastante do perfil obtido directamente a partir dos dados experimentais. É, portanto, possível concluir que o método de obtenção dos parâmetros de calibração proposto por Shiono e Knight (1991) é bastante exacto para esta altura relativa.

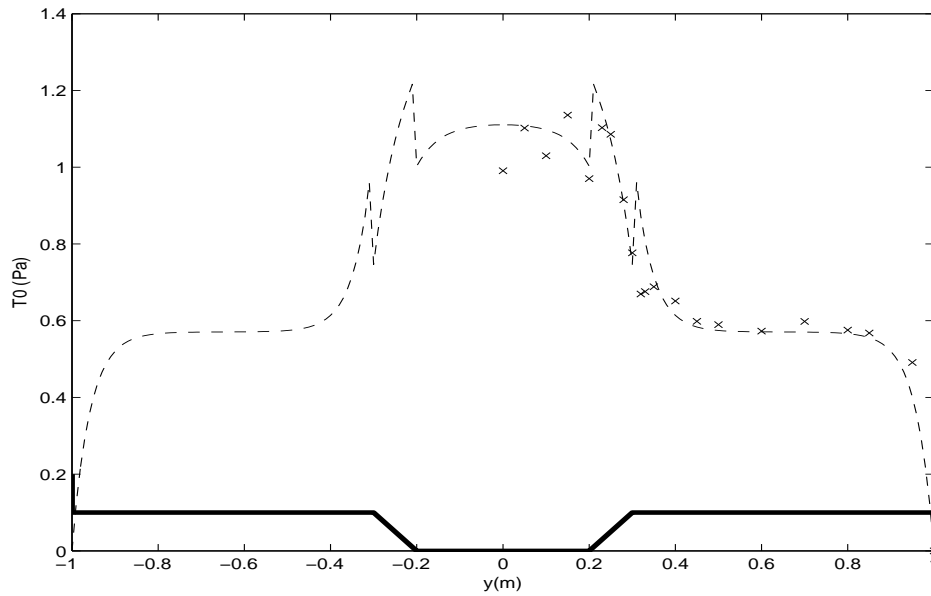


Figura 4.24: Validação dos parâmetros de calibração através da tensão de arrastamento para  $h_r = 0,30$

Para as alturas relativas  $h_r = 0,15, 0,20$  e  $0,25$ , é possível efectuar uma conclusão similar à apresentada para  $h_r = 0,10$  pois, como se pode verificar nas Figuras 4.26, 4.27 e 4.28, respectivamente, também existe uma boa aproximação entre o perfil obtido com os parâmetros de calibração calculados e o perfil obtido a partir dos dados experimentais.

Para a altura relativa  $h_r = 0,38$ , os resultados obtidos não apresentam a mesma precisão que apresenta para alturas relativas inferiores. Isto pode indicar que o modelo SKM começa a perder a fiabilidade para alturas relativas elevadas, pois a estruturas turbulentas que o modelo SKM considera deixam de ter um comportamento bem definido.

A mesma conclusão, já referida anteriormente, relativa à distribuição de  $\tau_0$  para  $h_r = 0,30$ , pode ser aplicada às distribuições da tensão de arrastamento obtidas para as restantes alturas relativas em estudo. Desta forma, as distribuições obtidas não apresentam o mesmo grau de precisão das distribuições obtidas para a velocidade longitudinal média em profundidade mas poderão ser úteis quando se pretende obter uma distribuição aproximada das tensões de arrastamento no canal.

Após a validação dos parâmetros de calibração calculados, realizou-se uma integração segundo a direcção transversal do perfil da velocidade longitudinal média em profundidade para, desta forma, se obter uma estimativa do caudal que a secção em estudo permite escoar, para cada altura relativa estudada. Este processo repetiu-se tanto para o perfil das velocidades obtidas directamente dos dados experimentais como para o perfil obtido da rotina de MATLAB que corria a

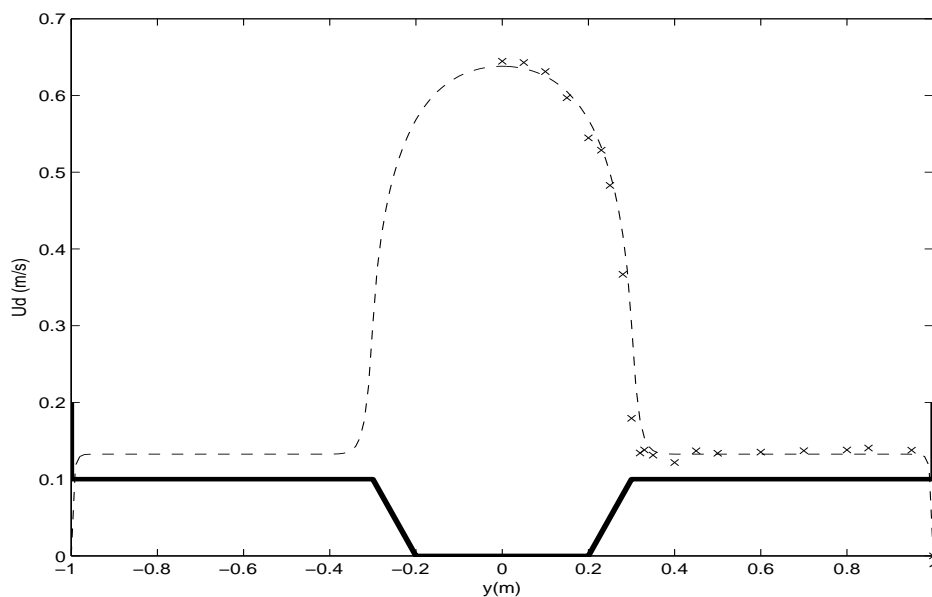


Figura 4.25: Validação dos parâmetros de calibração através da velocidade longitudinal para  $h_r = 0,10$

solução analítica do SKM. Os resultados obtidos são apresentados graficamente na Figura 4.35.

Da análise da figura é possível concluir que o modelo SKM, considerando os parâmetros de calibração calculados pelo procedimento anteriormente abordado, permite calcular com um óptimo grau de exactidão os valores de caudal que a secção tem capacidade de escoar. Se se analisar simultaneamente a Figura 4.35 e a Figura 4.29, conclui-se que apesar de o caudal obtido a partir dos dados experimentais e o caudal obtido a partir do SKM serem próximos, tal não significa que os perfis de velocidade obtido por ambos os métodos sejam semelhantes.

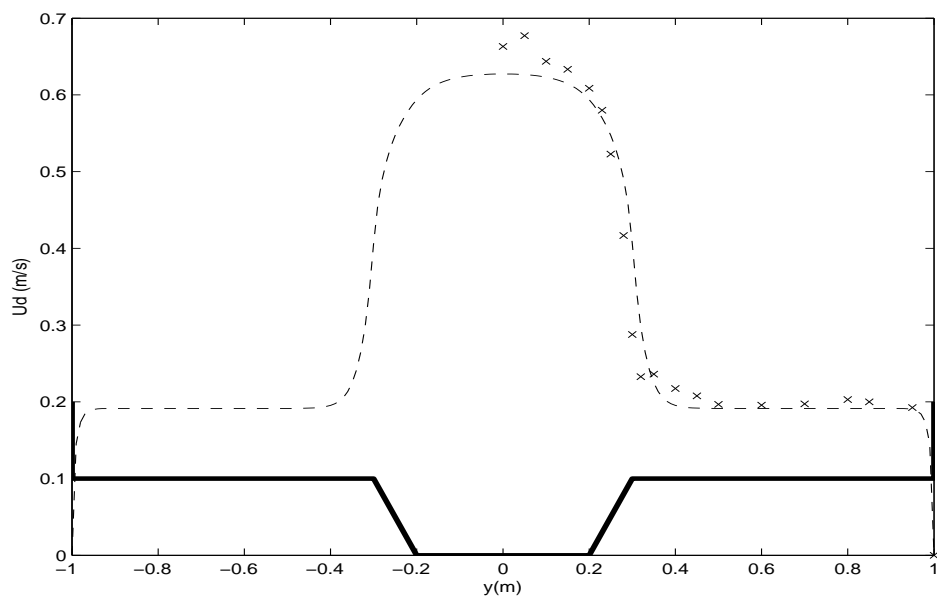


Figura 4.26: Validação dos parâmetros de calibração através da velocidade longitudinal para  $h_r = 0,15$

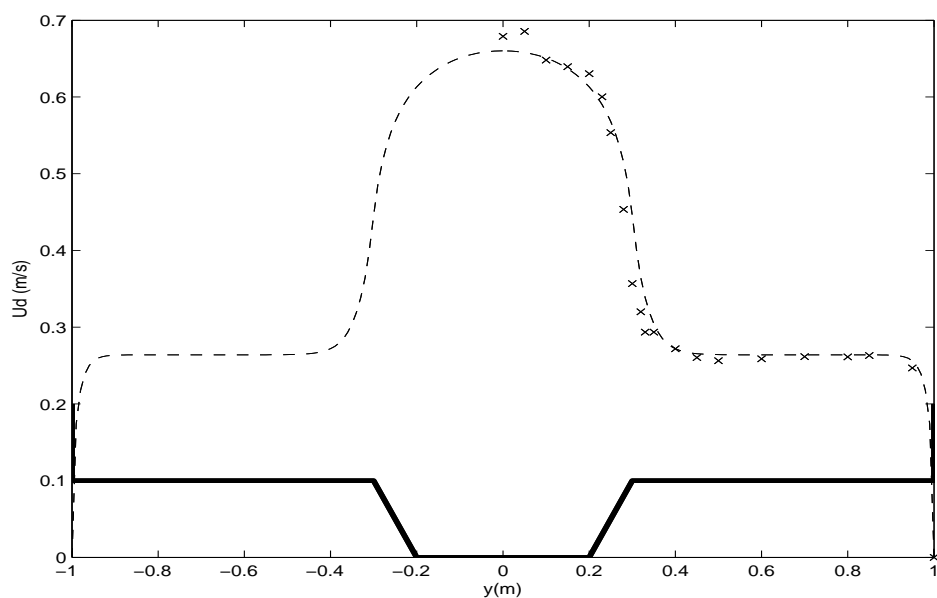


Figura 4.27: Validação dos parâmetros de calibração através da velocidade longitudinal para  $h_r = 0,20$

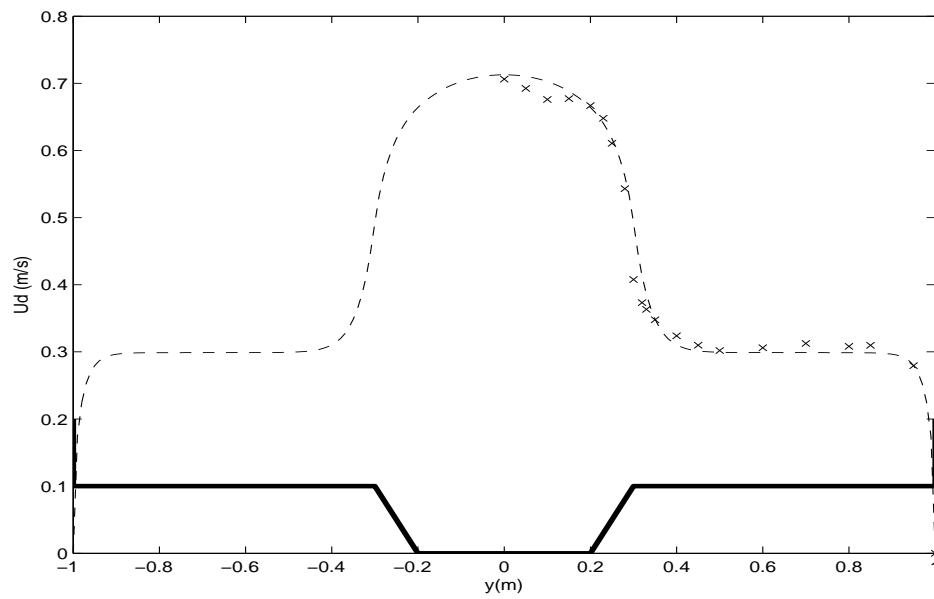


Figura 4.28: Validação dos parâmetros de calibração através da velocidade longitudinal para  $h_r = 0,25$

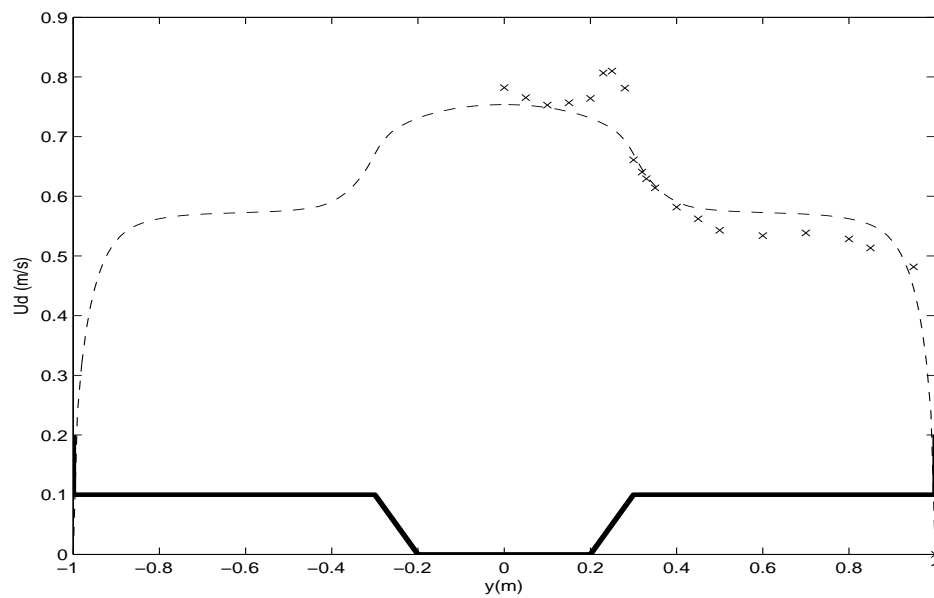


Figura 4.29: Validação dos parâmetros de calibração através da velocidade longitudinal para  $h_r = 0,38$

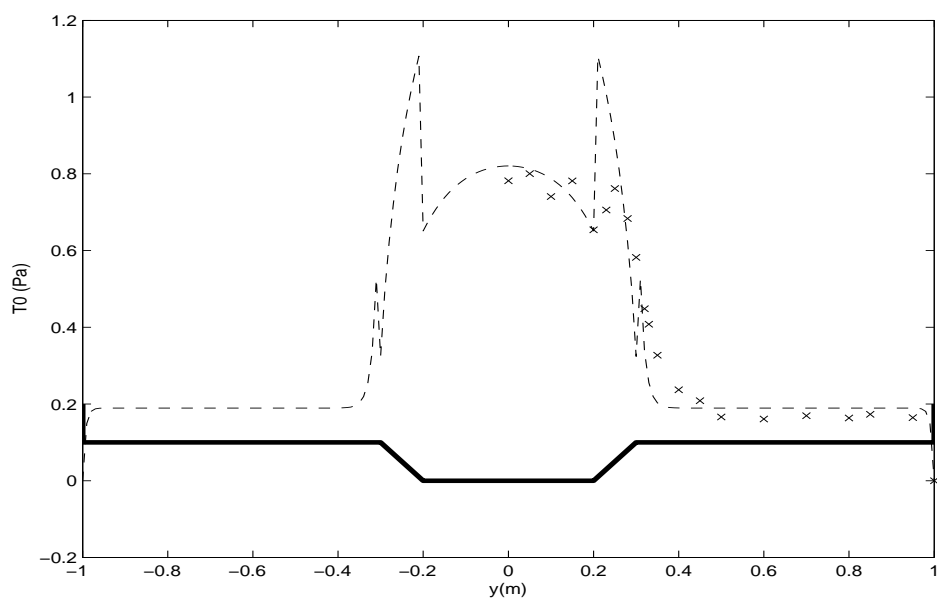


Figura 4.30: Validação dos parâmetros de calibração através da tensão de arrastamento para  $h_r = 0,10$

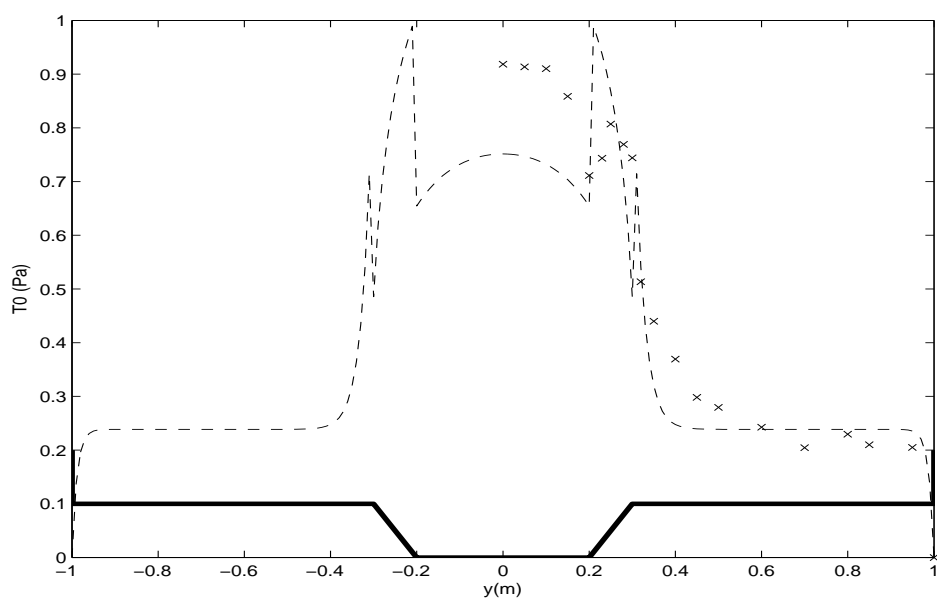


Figura 4.31: Validação dos parâmetros de calibração através da tensão de arrastamento para  $h_r = 0,15$



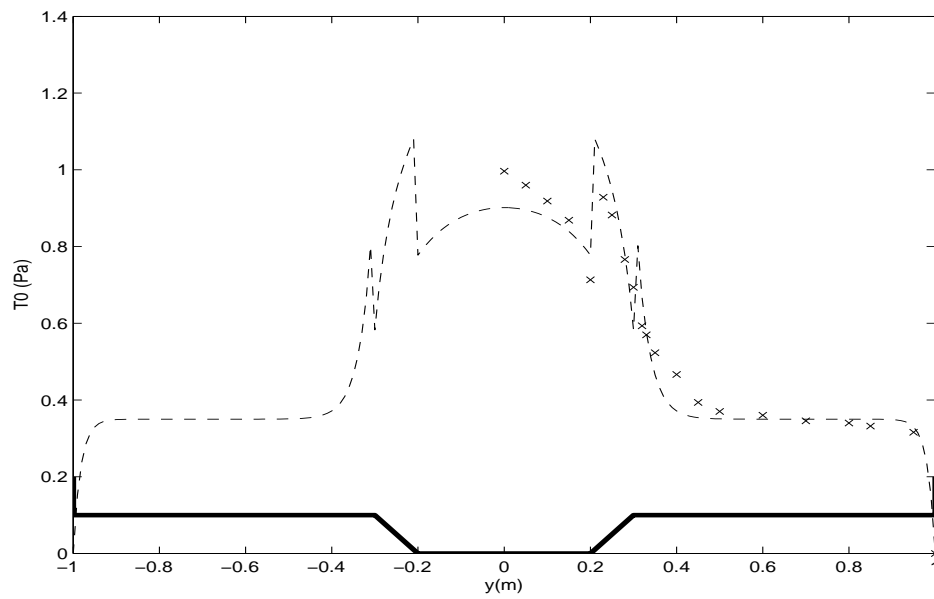


Figura 4.32: Validação dos parâmetros de calibração através da tensão de arrastamento para  $h_r = 0,20$

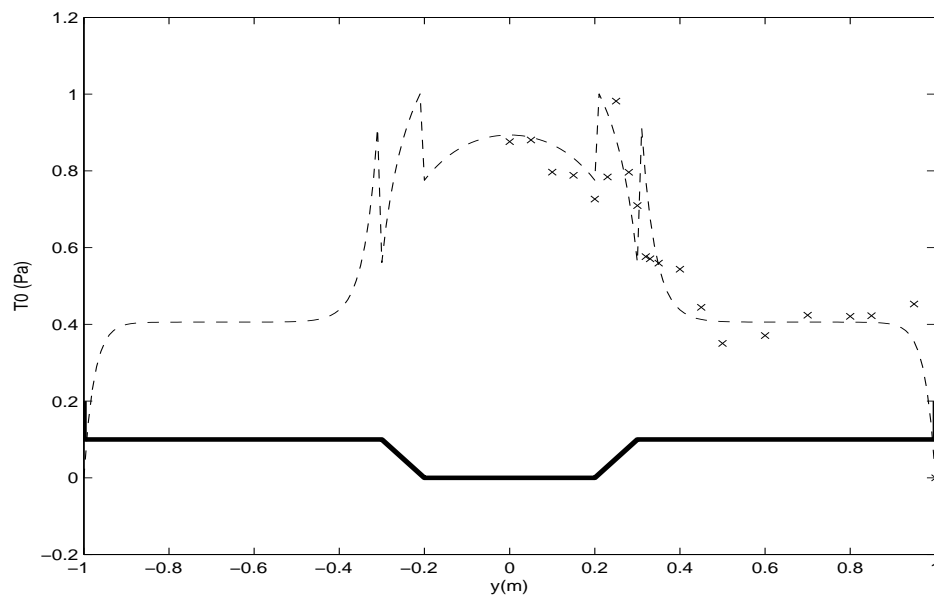


Figura 4.33: Validação dos parâmetros de calibração através da tensão de arrastamento para  $h_r = 0,25$

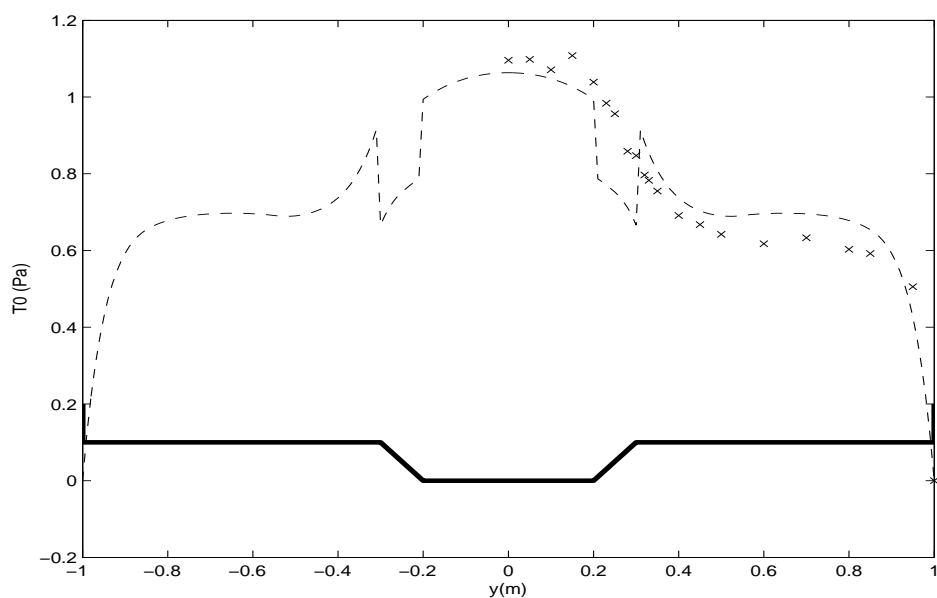


Figura 4.34: Validação dos parâmetros de calibração através da tensão de arrastamento para  $h_r = 0,38$

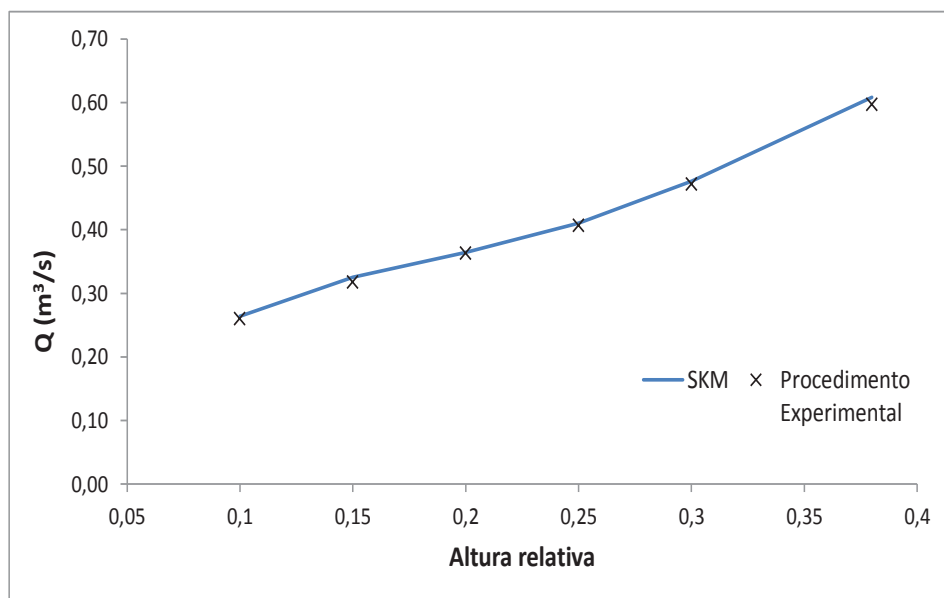


Figura 4.35: Curva de vazão experimental e obtida pelo SKM

## Capítulo 5

# Análise da contribuição das diferentes componentes da equação de conservação da quantidade de movimento

### 5.1 Parâmetros adimensionalizados ao longo da secção transversal

A equação média em profundidade da conservação da quantidade de movimento num elemento do fluido, proposta por Shiono e Knight (1991) e anteriormente mencionada na secção 2.3 com o índice 2.10, dita que o escoamento depende do comportamento das diversas parcelas que a constituem.

$$\underbrace{\frac{\partial H(\rho UV)_d}{\partial y}}_I = \underbrace{\rho g H S_0}_{II} + \underbrace{\frac{\partial H(\tau_{yx})_d}{\partial y}}_{III} - \underbrace{\tau_b \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}}}_{IV} \quad (5.1)$$

As parcelas que compõem a equação 5.1, são:

- I - Correntes secundárias
- II - Componente gravítica do escoamento
- III - Tensões de Reynolds
- IV - Tensão de arrastamento

Nesta secção é feito um estudo do comportamento destas parcelas ao longo da secção transversal do canal. Dado o contributo linear da parcela relativa à componente gravítica, antes denominada parcela II, optou-se por adimensionalizar as restantes parcelas, dividindo-as pela componente gravítica do escoamento. A variação das parcelas adimensionalizadas, para a altura relativa  $h_r = 0,30$ , é mostrada na Figura 5.1.

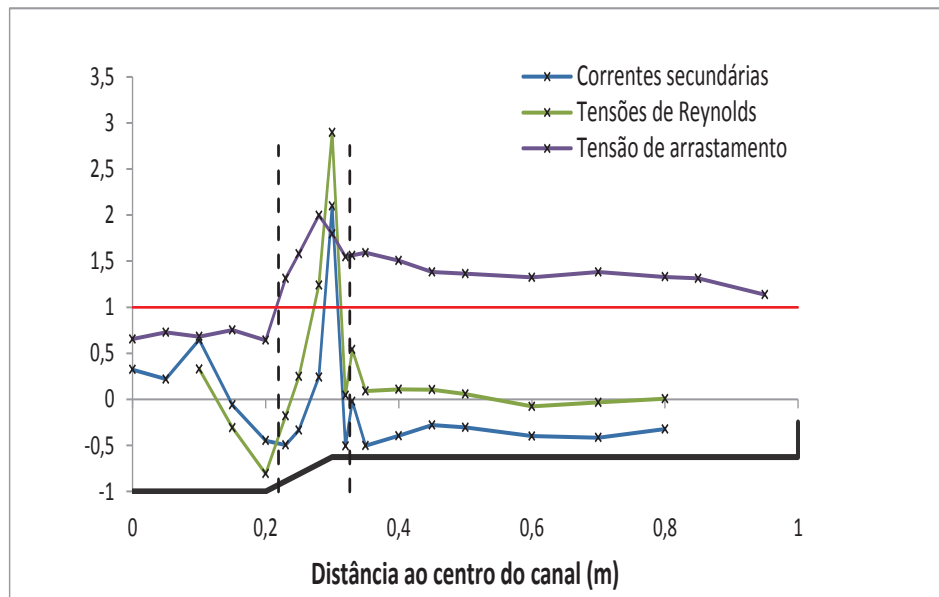


Figura 5.1: Contribuição dos diferentes componentes do escoamento ao longo da secção transversal do canal para  $h_r = 0,30$

Analisando a Figura 5.1 com mais detalhe, verifica-se que a componente relativa à tensão de arrastamento é a parcela com maior contribuição no escoamento, variando de forma linear no LP e no LC e possuindo uma variação na camada de mistura, devido à inclinação transversal nesta zona. De notar, também, o comportamento da componente das tensões de Reynolds, cuja influência sobe consideravelmente na zona da camada de mistura, derivado dos vórtices de eixo vertical provocados pelo elevado gradiente lateral de velocidade nessa zona. A parcela relativa às correntes secundárias, cuja importância é de salientar no LP, devido às fortes células de escoamento secundário que aí se fazem sentir, é a componente com menos importância no LC pois, nesta zona, as correntes secundárias são de menor intensidade comparativamente com o LP.

Para as restantes alturas relativas estudadas, (Figuras 5.2 a 5.6) é possível concluir que possuem um comportamento semelhante que se resume em:

- Na zona do LP, a componente que mais contribui para a quantidade de movimento é a componente gravítica.
- Na zona da camada de mistura, como seria de esperar, devido ao forte gradiente de velocidade nessa zona, as tensões de Reynolds são o parâmetro que mais influencia a capacidade do escoamento. Esta conclusão apenas não se verifica para a altura relativa de  $h_r = 0,38$ , pois para alturas relativas elevadas os vórtices de eixo vertical característicos nesta zona, são substituídos por um borbulhar intermitente (ver Ikeda *et al.*, 2001).
- Na zona do LC, o parâmetro que mais influência exerce sobre o escoamento é o parâmetro relativo às tensões de arrastamento. Este comportamento não

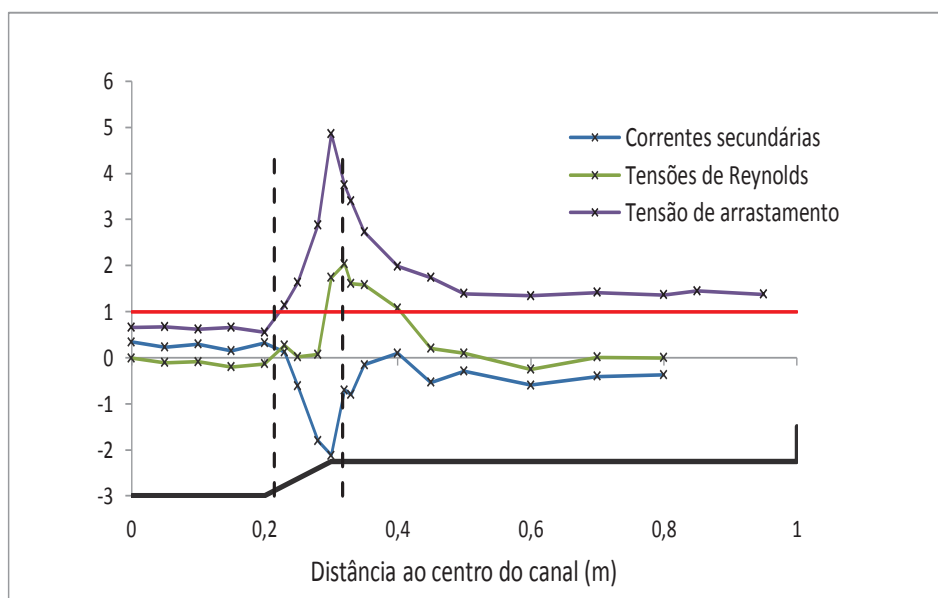


Figura 5.2: Contribuição dos diferentes componentes do escoamento ao longo da secção transversal do canal para  $h_r = 0,10$

se verifica para a altura relativa  $h_r = 0,38$ , pois o aumento da altura de água,  $H$ , no LC para esta altura relativa, motiva um aumento da contribuição da parcela gravítica numa proporção maior, em relação ao aumento da contribuição da parcela da tensão de arrastamento (ver Figura 4.3).

## 5.2 Análise da variação da contribuição das componentes segundo a altura relativa, $h_r$

O objectivo desta análise é de compreender a variação da contribuição das diferentes parcelas intervenientes na equação de equilíbrio da quantidade de movimento do escoamento, com a variação da altura de água e, consequentemente, da sua altura relativa. Para tal, foi calculada a influência total de cada componente adimensionalizada integrando o seu perfil na secção em estudo e de seguida, dividindo-se pelo comprimento dessa mesma secção. A adimensionalização dos parâmetros foi realizada dividindo cada uma das parcelas que compõem a equação da conservação da quantidade de movimento, pela componente gravítica. Da análise da Figura 5.7, é possível perceber qual a contribuição que cada componente do escoamento tem à medida que se varia a altura relativa.

Analisando a figura, termo a termo, é possível perceber a variação de cada uma das parcelas à medida que a altura relativa aumenta e qual a escala da sua contribuição comparativamente às outras parcelas para cada altura relativa. Sempre que, na figura, as barras sejam superiores à unidade, ou seja, sejam superiores à linha horizontal da figura, significa que a contribuição da parcela em

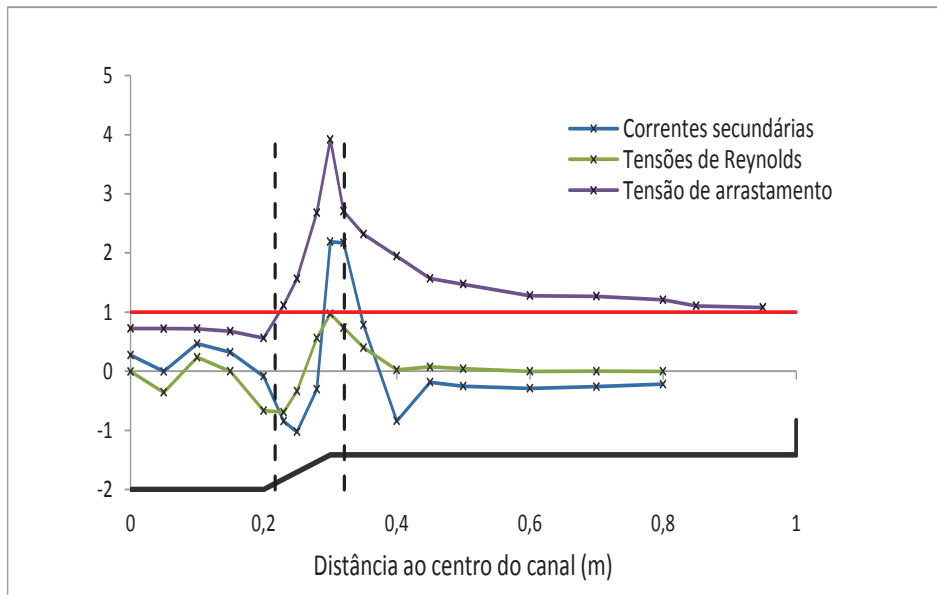


Figura 5.3: Contribuição dos diferentes componentes do escoamento ao longo da secção transversal do canal para  $h_r = 0,15$

causa, é superior à contribuição da parcela gravítica.

Seria de esperar que, à medida que a altura relativa fosse aumentando, o contributo da componente das tensões de Reynolds fosse diminuindo, mas isso não acontece para  $h_r = 0,15$ . Analisando a Figura 4.2, é possível observar que na zona do painel de transição, as tensões de Reynolds são mais elevadas quando comparadas com as restantes alturas relativas. Isto pode suceder devido a erros de medições ou de tratamento dos dados analisados.

Pode-se concluir também, que a contribuição da parcela relativa à tensão de arrastamento diminui, ao aumentar a altura relativa. Este comportamento acontece pois a componente gravítica aumenta a sua influência, à medida que se aumenta a altura relativa, numa proporção maior que o aumento da tensão de arrastamento. Existe uma excepção a este comportamento para  $h_r = 0,30$ .

De notar ainda, a fraca contribuição da componente das tensões de Reynolds para  $h_r = 0,38$ . Tal ocorre porque, as velocidades no LP e no LC têm tendência a aproximar-se à medida que se aumenta a altura relativa. Este comportamento provoca uma diminuição do gradiente lateral de velocidade longitudinal média em profundidade (Ver Figuras 4.4 e 4.2). De acordo com Ikeda *et al.* (2001), para alturas relativas elevadas, os vórtices turbulentos vão perdendo intensidade, sendo substituídos por um borbulhar intermitente.

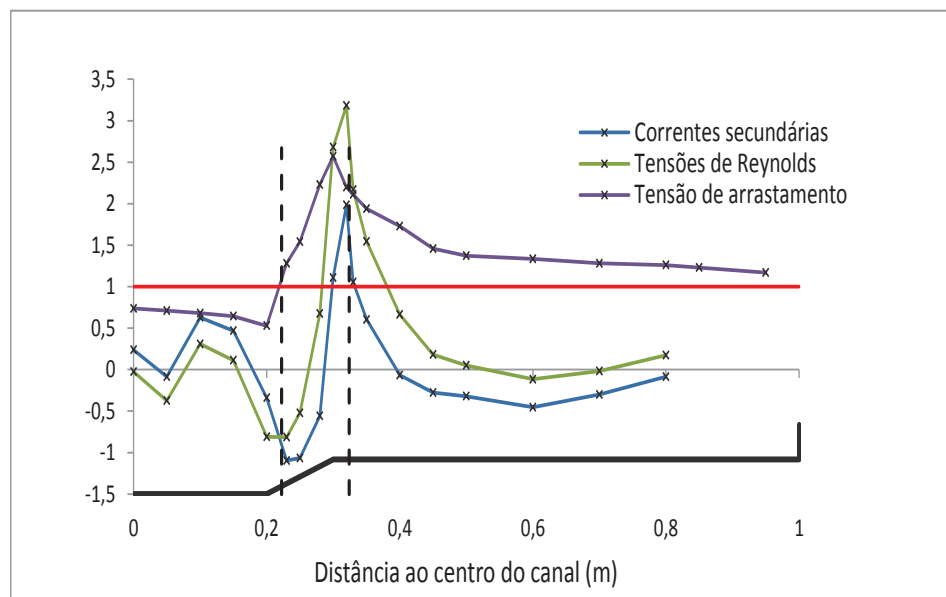


Figura 5.4: Contribuição dos diferentes componentes do escoamento ao longo da secção transversal do canal para  $h_r = 0,20$

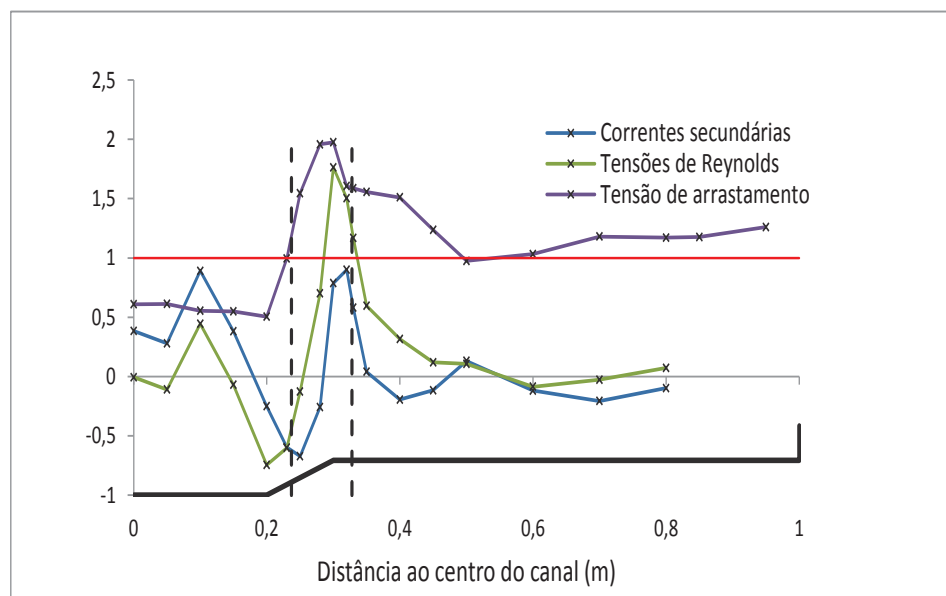


Figura 5.5: Contribuição dos diferentes componentes do escoamento ao longo da secção transversal do canal para  $h_r = 0,25$

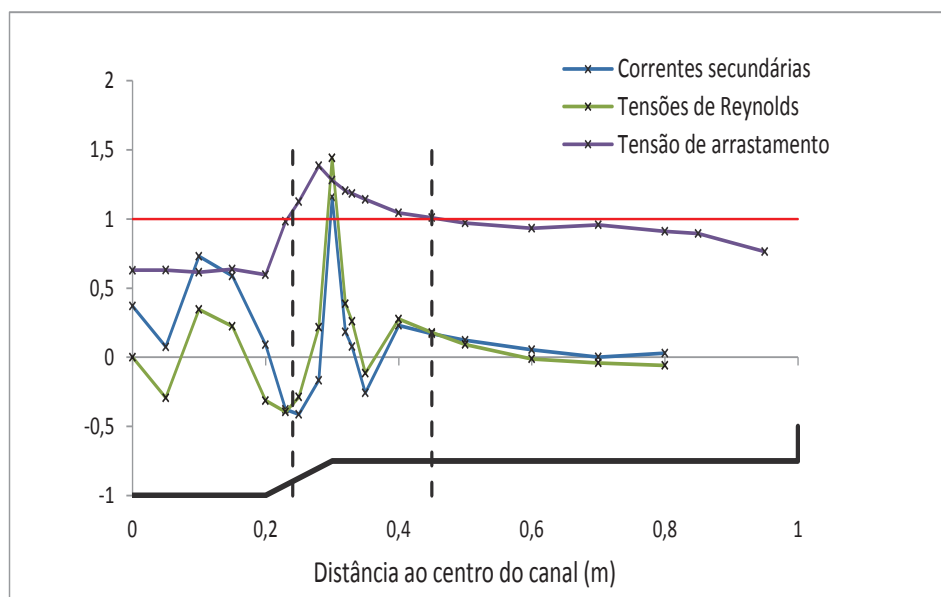


Figura 5.6: Contribuição dos diferentes componentes do escoamento ao longo da secção transversal do canal para  $h_r = 0,38$

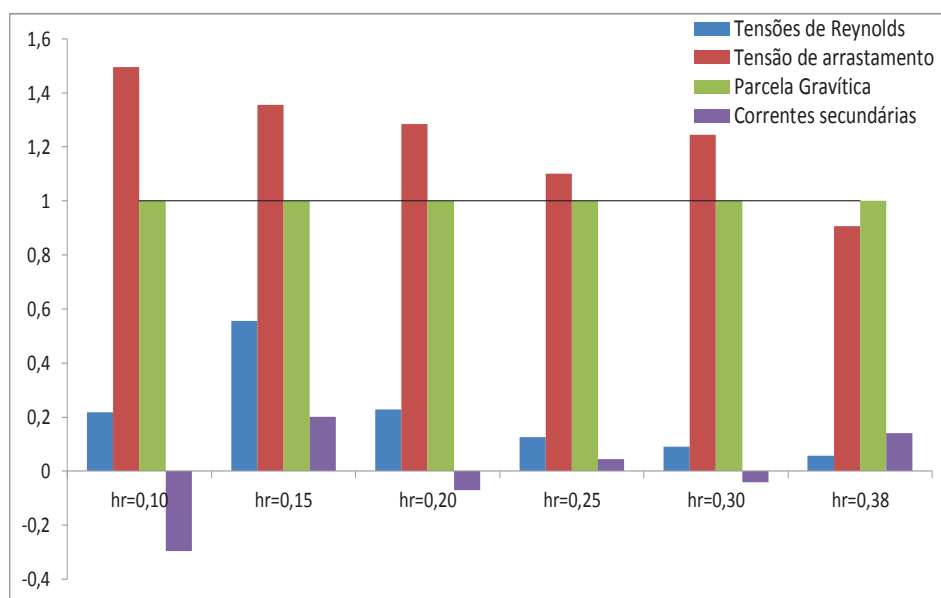


Figura 5.7: Contribuição dos diferentes parâmetros para o escoamento segundo a altura relativa



## Capítulo 6

# Conclusões

Nesta dissertação foram analisados dados experimentais obtidos por Pinto (2010), Massa (2011) e Teixeira (2011) relativos às velocidades de escoamento e às tensões de arrastamento que se verificam num escoamento em secção composta e foi aplicada a metodologia proposta por Shiono e Knight (1991) para obtenção dos parâmetros de calibração. Estes parâmetros, quando correctamente calibrados, permitem que o modelo SKM consiga prever com um grau de aproximação bastante razoável o perfil de velocidade longitudinal média em profundidade e o perfil das tensões de arrastamento.

Da presente dissertação, as conclusões a retirar são:

- O modelo SKM com os parâmetros correctamente calibrados consegue calcular, com um grau de aproximação bastante razoável, o perfil da velocidade longitudinal média em profundidade e o perfil das tensões de arrastamento.
- A obtenção do parâmetro de resistência de fundo,  $f$ , a partir dos dados experimentais não apresenta grandes dificuldades e nos casos de estudo realizados, os resultados obtidos ficaram dentro do que seria de esperar.
- O cálculo do parâmetro que traduz a viscosidade turbulenta  $\lambda$ , revelou-se um pouco mais difícil de obter pois implicou efectuar uma derivação dos dados experimentais, estando este processo sujeito a erros que afectam os resultados obtidos para este parâmetro.
- A metodologia proposta por Shiono e Knight (1991) para o cálculo do parâmetro de calibração das correntes secundárias,  $\Gamma$ , mencionada nesta dissertação como “Metodologia A”, não devolve resultados aceitáveis.
- O modelo SKM, para alturas relativas elevadas, começa a perder a fiabilidade nas previsões da velocidade longitudinal e nas tensões de arrastamento, o que permite concluir que, para alturas relativas superiores a  $h_r = 0,30$ , não deve ser aplicado.
- O estudo da variação do peso das componentes do escoamento, permitiu chegar à conclusão de que, apesar de algumas excepções, o comportamento das componentes encontrava-se dentro do que seria de

esperar, ou seja, a componente das tensões de Reynolds diminuem com o aumento da altura relativa, devido à redução da interacção na interface e, a componente da tensão de arrastamento reduz a sua influência com o aumento da altura relativa, principalmente, devido ao aumento da altura de água.

Como sugestões para trabalhos futuros, seria interessante:

- Efectuar a calibração dos parâmetros do modelo SKM, a partir dos dados experimentais já existentes com painéis de cheia com fundo rugoso.
- Realizar medições de velocidade e de tensões de arrastamento em canais reais, e efectuar a calibração dos parâmetros do SKM, para esses casos.

# Bibliografia

- [1] ABRIL, J. B. e KNIGHT, D. W.: *Stage-Discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model (Não consultado)*. Journal of Hydraulic Research, vol. 42:págs. 616–629, 2004.
- [2] ACKERS, P.: *Hydraulic design of straight compound channels (Não consultado)*. SR Report SR 281, HR Wallingford, vol. 1 e 2:págs 1–131 e 1–139, 1991.
- [3] ACKERS, P.: *Stage-Discharge functions for two-stage channels: The impact of new research (Não consultado)*. Water and Environment Journal, vol. 7:págs. 52–59, 1993a.
- [4] ACKERS, P.: *Flow formulae for straight two-stage channels (Não consultado)*. Journal of Hydraulic Research, vol. 31, Num. 4:págs. 509–531, 1993b.
- [5] ANPC, Autoridade Nacional de Protecção Civil: *O que é uma cheia*, Janeiro 2012. <http://www.prociv.pt/PrevencaoProteccao/RiscosNaturais/>, Acedido em 15 de Janeiro 2012.
- [6] CHOW, V. T.: *Open Channel Hydraulics (Não consultado)*. MacGraw-Hill, 1959.
- [7] DUARTE, P.: *Influência da rugosidade das planícies de inundação na capacidade de vazão de rios*. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Monte da Caparica, 2011.
- [8] FERNANDES, J.; LEAL, J. e CARDOSO A: *Apparent friction coefficient in straight compound channels*. Journal of Hydraulic Research, vol. 49:págs. 836–838, 2011.
- [9] GORING, D. G. e NIKORA, V. I.: *Despiking acoustic Doppler velocimeter records (Não consultado)*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 128:págs. 117–126, 2002.
- [10] HUAI, W.; XU, Z.; YANG Z. e ZENG Y.: *Two dimensional analytical solution for a partially vegetated compound channel flow*. Relatório Técnico, Shanghai University, 2008.
- [11] IKEDA, S.: *Self-formed straight channels sandy beds (Não consultado)*. Journal of the Hydraulics Division, vol. 107:págs 389–406, 1981.

- [12] IKEDA, S.: *Role of lateral eddies in sediment transport and channel formation, River Sedimentation (Não consultado)*. Balkema Rotterdam, 1999.
- [13] KNIGHT, D. W. e ABRIL, B.: *Refined calibration of a depth averaged model for turbulent flow in a compound channel (Não consultado)*. Proceedings of the Institute of Civil Engineering - Water Maritime, Paper 11017, Vol.118:págs 151–159, 1996.
- [14] KNIGHT, D. W.: *Flow mechanisms and sediment transport in compound channels*. International Journal of Sediment Research, vol. 14(2):págs 217–236, 1999.
- [15] KNIGHT, D. W.: *Scoping study on reducing uncertainty in river flood conveyance*. Relatório Técnico, HR Wallingford & the Environment Agency, 2001.
- [16] KNIGHT, D. W. e MOHAMMED, E.: *Boundary shear in symmetrical compound channels (Não consultado)*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 109:págs 1073–1092, 1984.
- [17] KNIGHT, D. W. e DEMETRIOU, J. D.: *Flood Plain and Main Channel Flow Interaction (Não consultado)*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 109:págs 1073–1092, 1983.
- [18] KNIGHT, D. W.; OMRAM, M. e TANG X.: *Modeling Depth-Averaged Velocity and Boundary Shear in Trapezoidal Channels with Secondary Flows*. Journal of Hydraulic Engineering, 10.1061/(ASCE)0733-9429:págs 39 – 47, 2007.
- [19] KNIGHT, D. W., SHIONO K. e PIRT J.: *Prediction of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow (Não consultado)*. Procedure at the International Conference on Hydraulic and Environment Modeling of Coastal, Estuarine and River Waters. Universidade de Bradford, Gower Technical Press, Paper 38:págs 419–428, 1989.
- [20] KNIGHT, D. W.; TANG, X.; STERLING M.; SHIONO K. e MCGAHEY C.: *Solving open channel flow problems with a simple lateral distribution model*. River Flow 2010, páginas 41–48, 2010.
- [21] LAMBERT, M. F. e MYERS, W. R.: *Estimating the discharge capacity in straight compound channels, Proceedings of the Institution of Civil Engineers (Não consultado)*. Journal of Water, Maritime and Energy, Vol. 130:págs. 161–207, 1998.
- [22] MASSA, P.: *Influência da rugosidade dos leitos de cheia em escoamentos em canais de secção composta*. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Monte da Caparica, 2011.
- [23] MCGAHEY, C. e SAMUELS, P.: *Methodology for conveyance estimation in two-stage straight, skewed and meandering channels*. Relatório Técnico, HR Wallingford, 2003.

- [24] NEZU, I e NAKAGAWA, H.: *Turbulence in open channel flow*. In *IAHR Monograph*, A. A. Balkema, Rotterdam, 1993.
- [25] PARREIRA, H., FERNANDES J. e LEAL J.: *Aplicação de soluções analíticas em canais com secção composta*. 2012.
- [26] PARREIRA, H.: *Aplicação de soluções analíticas no estudo de correntes secundárias em canais com secção composta*. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciência e Tecnologia, Monte da Caparica, 2011.
- [27] PINTO, D.: *Caracterização experimental de escoamentos em canais de secção composta*. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Monte da Caparica, 2010.
- [28] PROOIJEN, B.; BATTJES, J. e UIJTTEWAAL W.: *Momentum exchange in straight uniform compound channel flow (Não consultado)*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131:págs. 175–183, 2005.
- [29] SHIONO, K. e KNIGHT, D. W.: *Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel*. Journal of Hydraulic Research, vol. 28:págs. 175–196, 1989.
- [30] SHIONO, K. e KNIGHT, D. W.: *Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 222:págs 617 – 646, 1991.
- [31] SHIONO, K.: *Stage-discharge estimation with analytical solutions in single and two stage channel flows, Technical Session under the work of the Specialized Commission in Fluvial Hydraulics of APRH, LNEC, Lisbon, Portugal*. 2011.
- [32] TANG, X. e KNIGHT, D. W.: *A general model of lateral depth-averaged velocity distributions for open channel flows*. The University of Birmingham, vol. B15 2TT:págs 846–857, 2008.
- [33] TANG, X. e KNIGHT, D. W.: *Lateral distributions of streamwise velocity in compound channels with partially vegetated floodplains (Não consultado)*. Sci China Ser E-tech Sci, vol. 52(11):págs. 3357–3362, 2009.
- [34] TEIXEIRA, E.: *Estudo experimental de escoamentos em regime uniforme e não uniforme em canais de secção composta*. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciência e Tecnologia, Monte da Caparica, 2010.
- [35] WORMLEATON, P. R.: *Floodplain secondary circulation as a mechanism for flow and shear stress redistribution in straight compound channels. (Não consultado)*. In *Coherent flow structures in open channels*. Ashworth, Bennett, Best and McLelland, eds., Wiley, New York, 1996.

- [36] WRIGHT, N. G.: *Scoping study for reducing uncertainty in river flood conveyance - Conveyance implications for 2-D and 3-D modelling (Não consultado)*. Relatório Técnico, Environment Agency, 2001.
- [37] ZENG, Y. H.; GUYMER, I.; SPENCE K. J. e HUAI W. X.: *Application of analytical solutions in trapezoidal compound channel flow*. Wiley InterScience, vol. 10.1002/rra 1433, 2010.